

# EDELWEISS-LT

## Прямой поиск легких WIMP с HPGe полупроводниковыми боллометрами

- Темная материя
- Темная материя, когерентное рассеяние, легкие WIMP
- Эксперименты по прямому поиску, экспериментальные задачи и проблемы
- Эксперимент EDELWEISS, результаты
- Поиск "легких" WIMP в эксперименте EDELWEISS-LT
- Заключение

# Universe

~4% **NORMAL MATTER**

~23% **DARK MATTER**

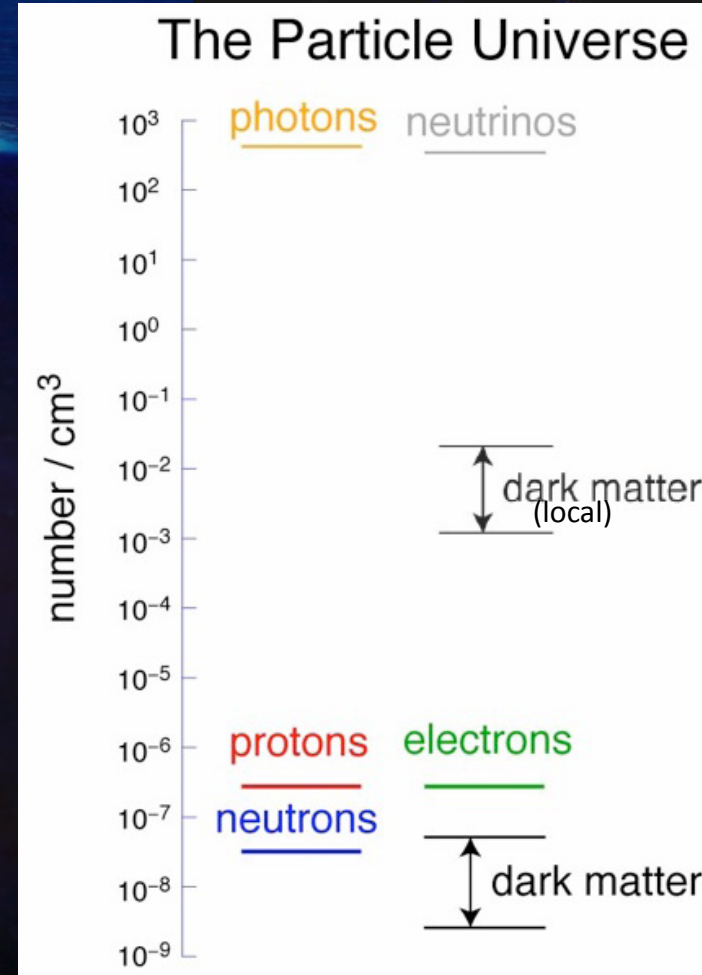
**DARK ENERGY**

**DARK ENERGY**

~73%

**DARK ENERGY**

**DARK ENERGY**



## БАК:

Возможно удастся увидеть недостачу энергии, однако будет трудно доказать, что новая частица(ы) стабильна и именно эта частица образует темную материю

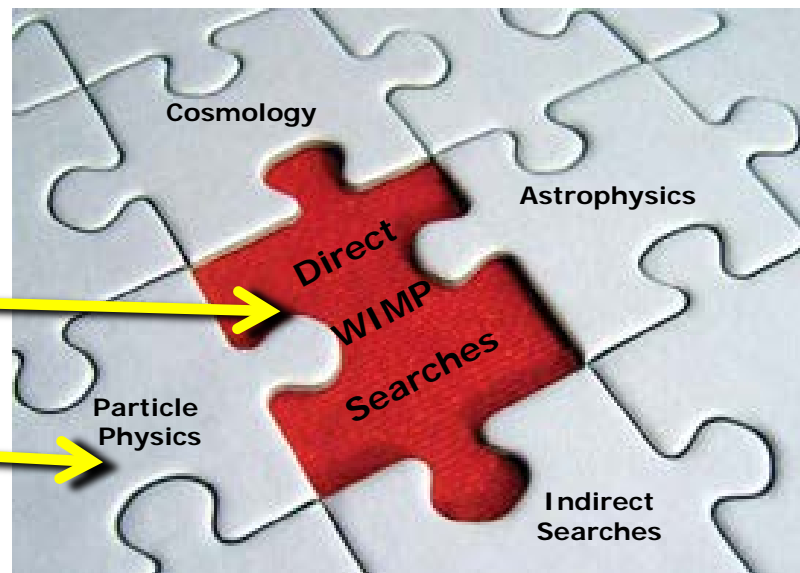
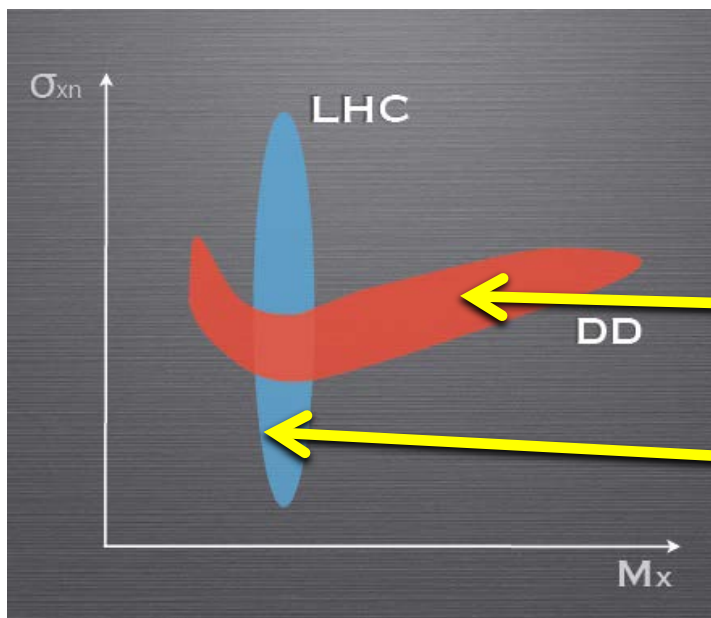
## Косвенные методы обнаружения (сигналы из Космоса):

Высокоэнергичные нейтрино от Солнца (Земли), антиматерия ( $e^+$ , ...) от аннигиляции  $WIMP$  пар в гало нашей галактики,  $\gamma$ -лучи от аннигиляции  $WIMP$  пар в центре галактики, ...

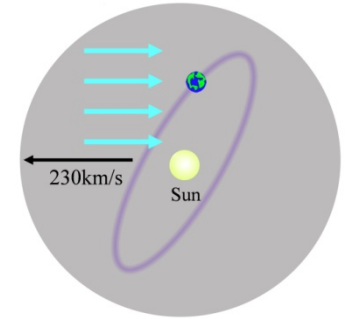
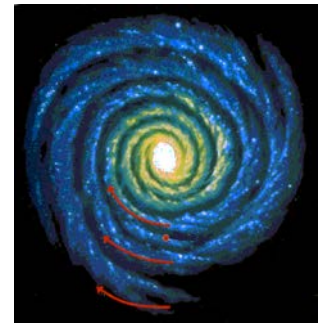
Из-за высокого многообразия астрофизических явлений большинство наблюдений имеет множественную интерпретацию.

**Прямой поиск:** наблюдение рассеяния  $WIMP$  на мишени в лаборатории. Два подхода: 1) как можно полное подавление фона; 2) поиск признаков дополнительного сигнала при значительном фоне: измерения с низким порогом + поиск полугодовых модуляций сигнала

Прямые измерения дадут прямые доказательства, однако не смогут дать точные значения массы и сечения - т.к. интерпретация результатов сильно зависит от модели

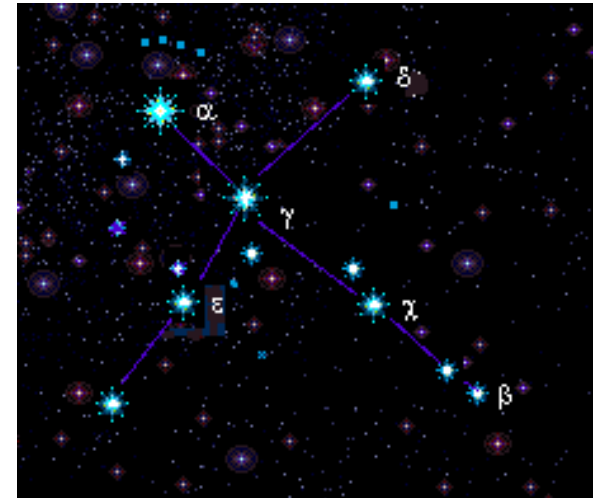


Анализ формирования структур во Вселенной показывает, что темная материя (DM) является "холодной", т.е. нерелятивистской, и что DM является основой кластеров обычной материи (галактик и скоплений галактик). Обычная материя в галактике связана с более массивным гало DM, локальная плотность которой составляет  $\sim 0.3 \text{ ГэВ/см}^3$ . При нашем (Солнечная система) движении в галактике мы движемся через гало темной материи, которая при этом может рассеиваться на обычной материи, если например обладает слабым взаимодействием (WIMP). Именно поиском такого рассеяния мы и занимаемся!

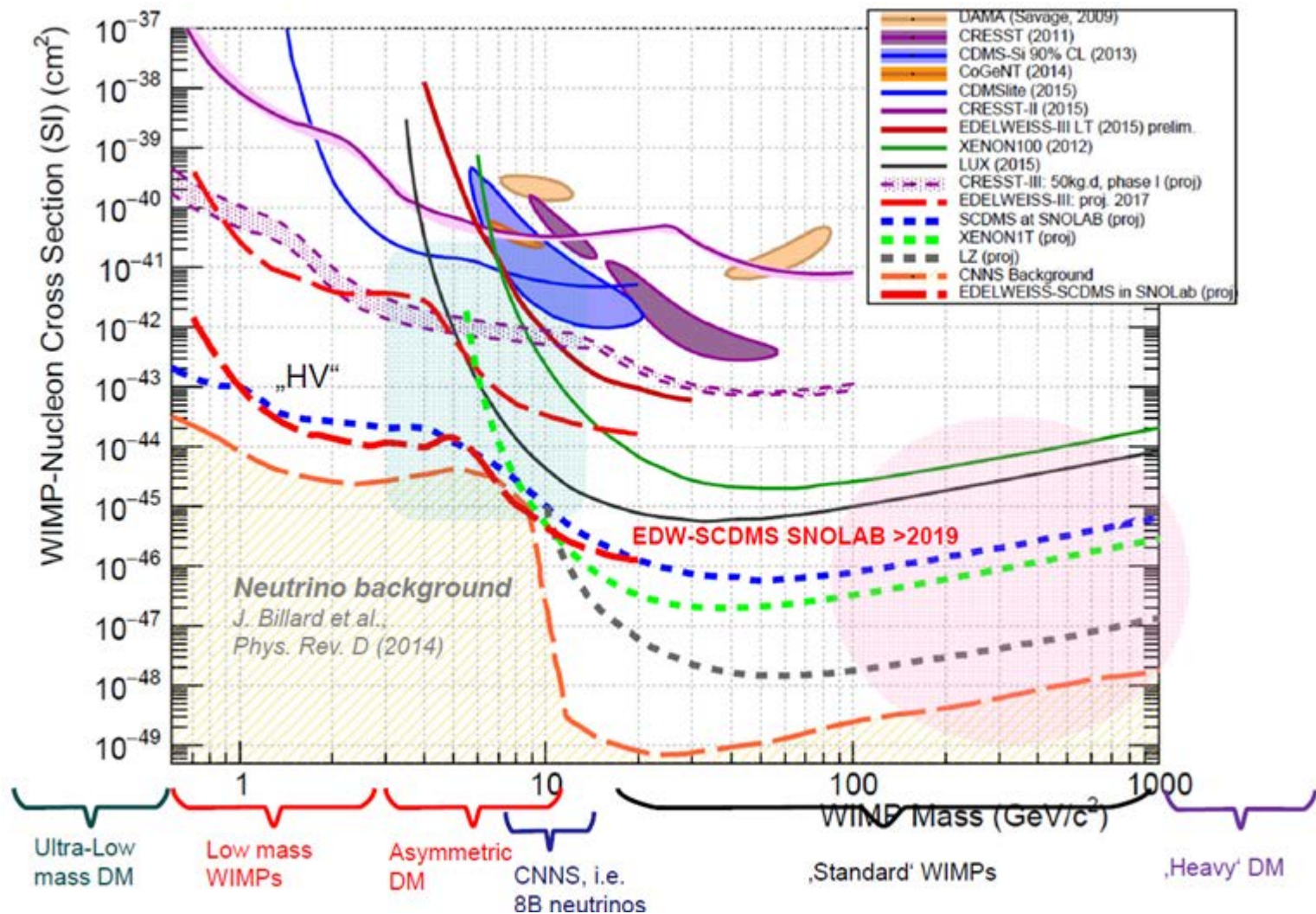


Wimp  $\chi$   
Из галактического гало  
 $V \sim 230 \text{ км/сек}$

Ядро А  
В покое (лаборатория)  
 $v=0 \text{ км/сек}$

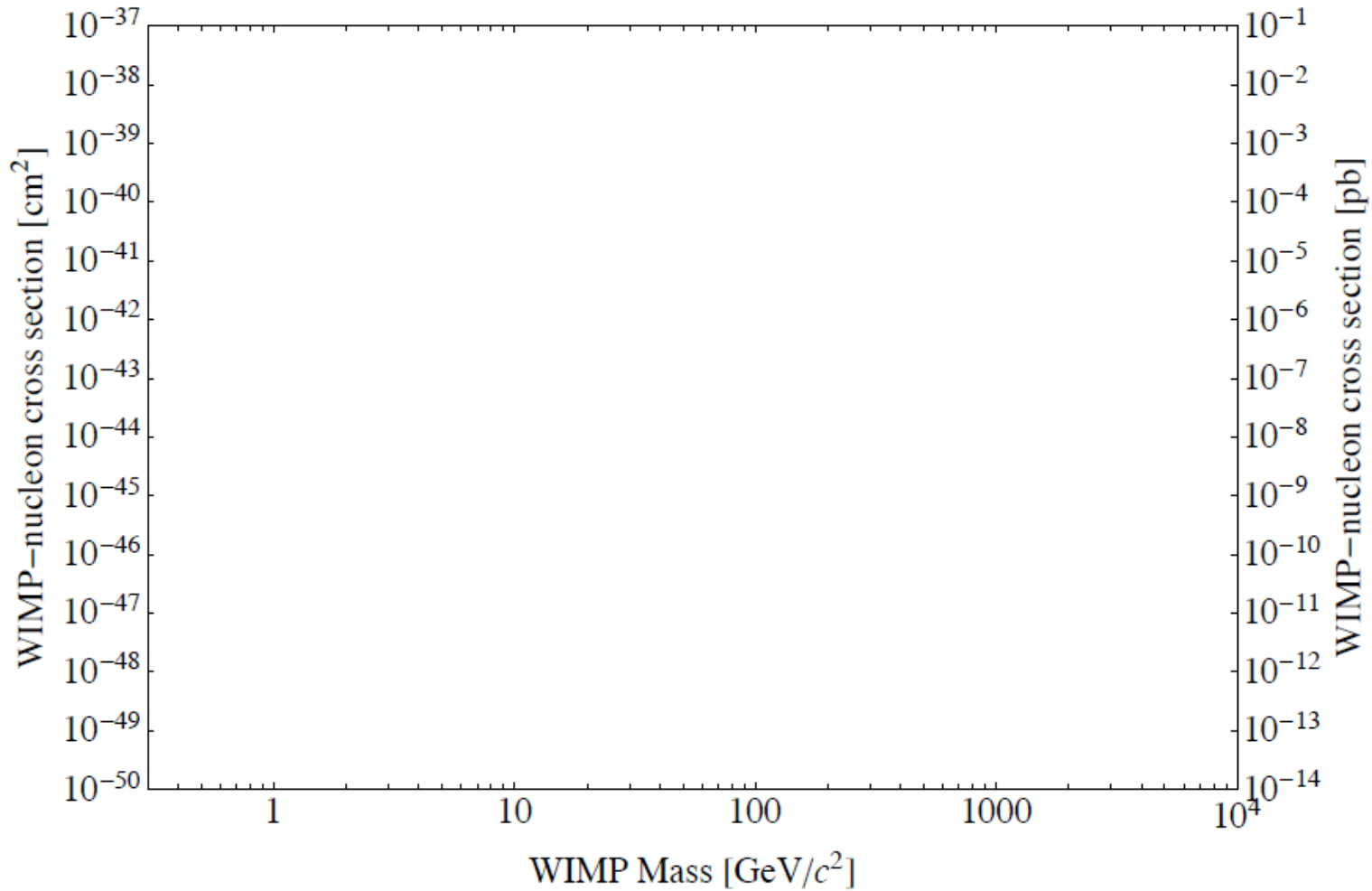
$$E_R = E_\chi \frac{4 M_A M_\chi}{(M_A + M_\chi)^2} \cos^2 \theta_A$$




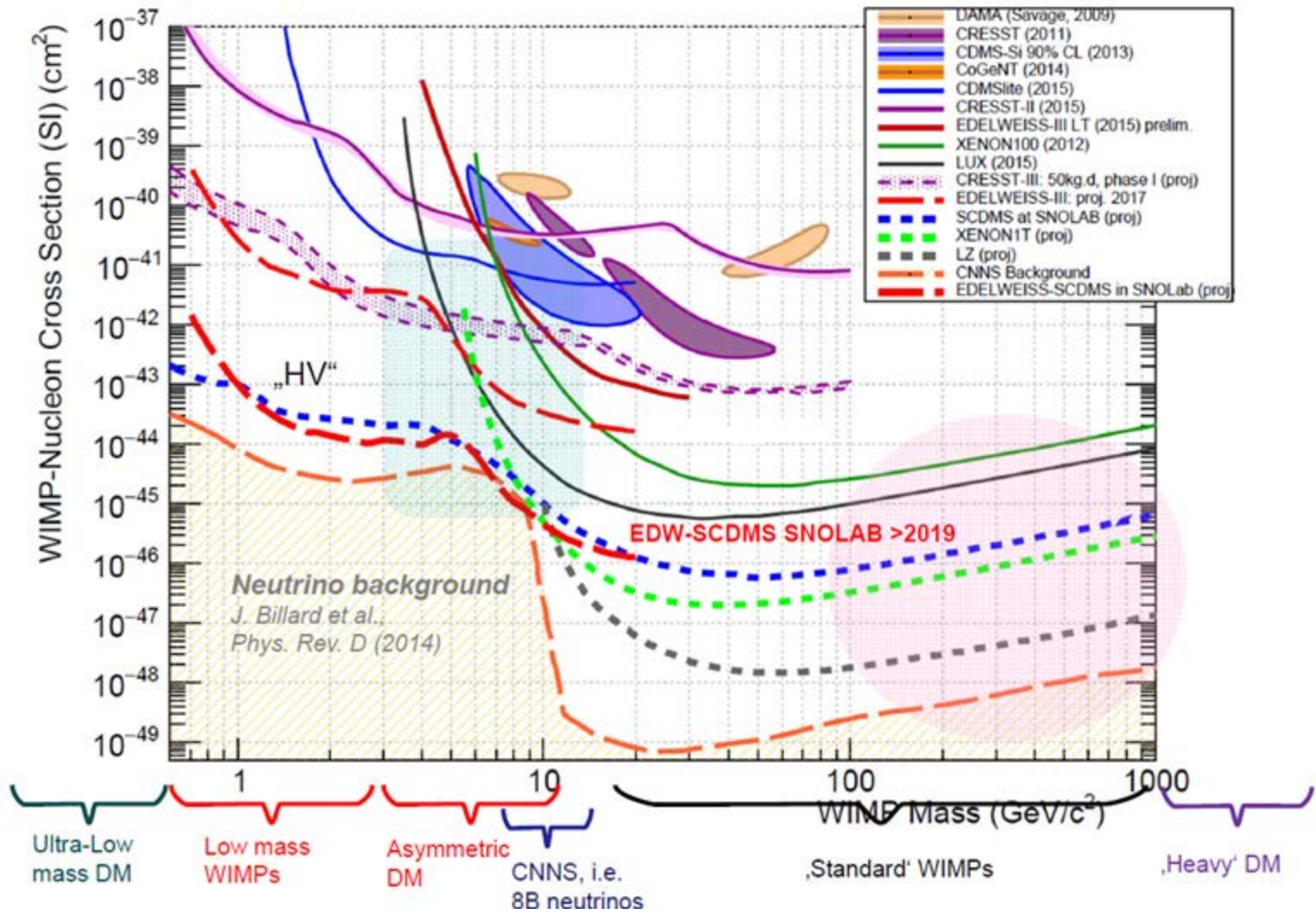


Последние несколько лет: значительный прогресс в улучшение чувствительности экспериментов по прямому поиску частиц темной материи (WIMP).  
 Противоречивые результаты, особенно в области низких масс WIMP

# Множество возможностей...

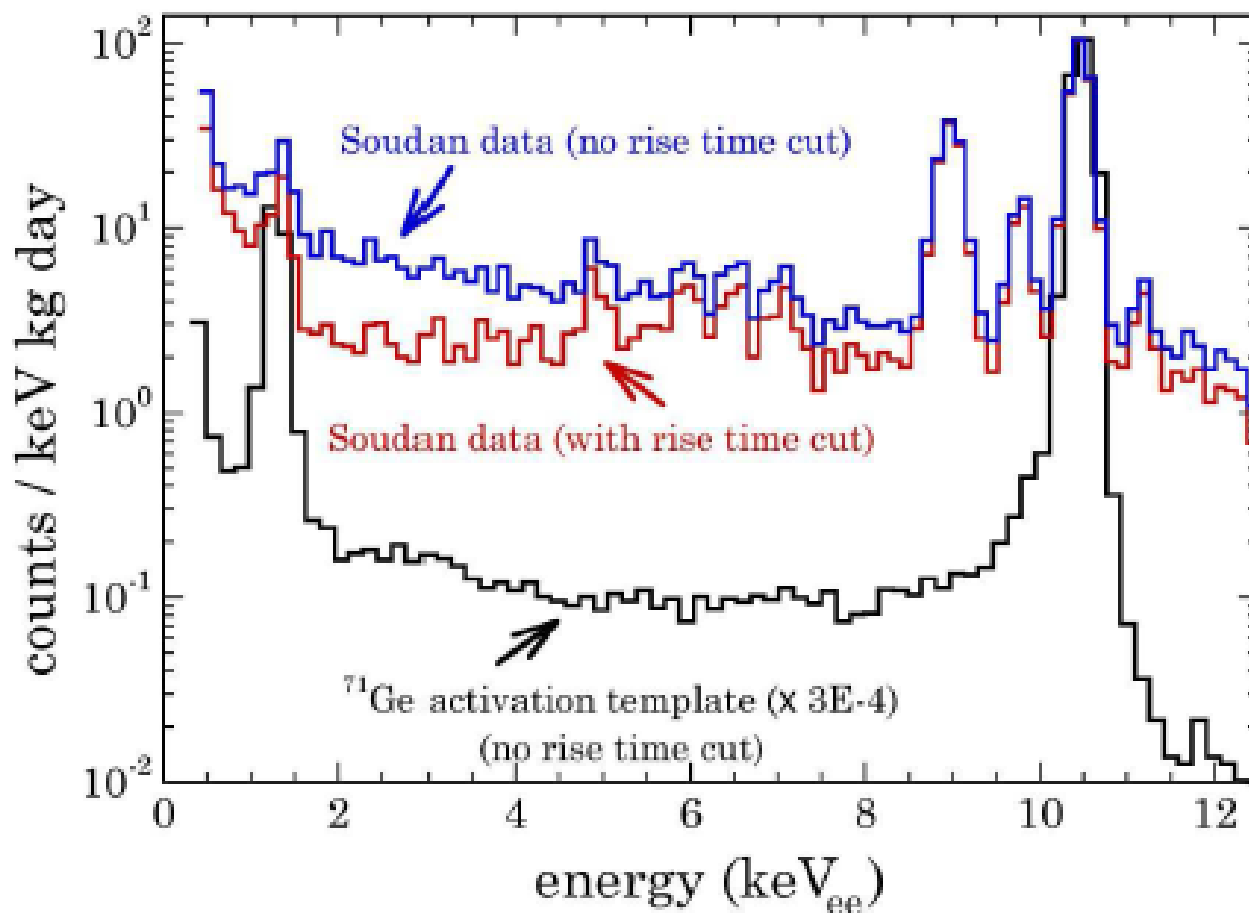


**При чем здесь  
когерентное рассеяние?**





- Сигнал легких WIMP может быть неустранимым фоном для детектирования когерентного рассеяния в реакторных экспериментах;



CoGeNT data. Fig. 28 from arXiv:1208.5737v3 [astro-ph.CO].

# Что собой представляет современный детектор частиц темной материи?

$$E_R < \sim 100 \text{ кэВ}$$

Высокоэффективный детектор,  
низкий порог, высокое разрешение

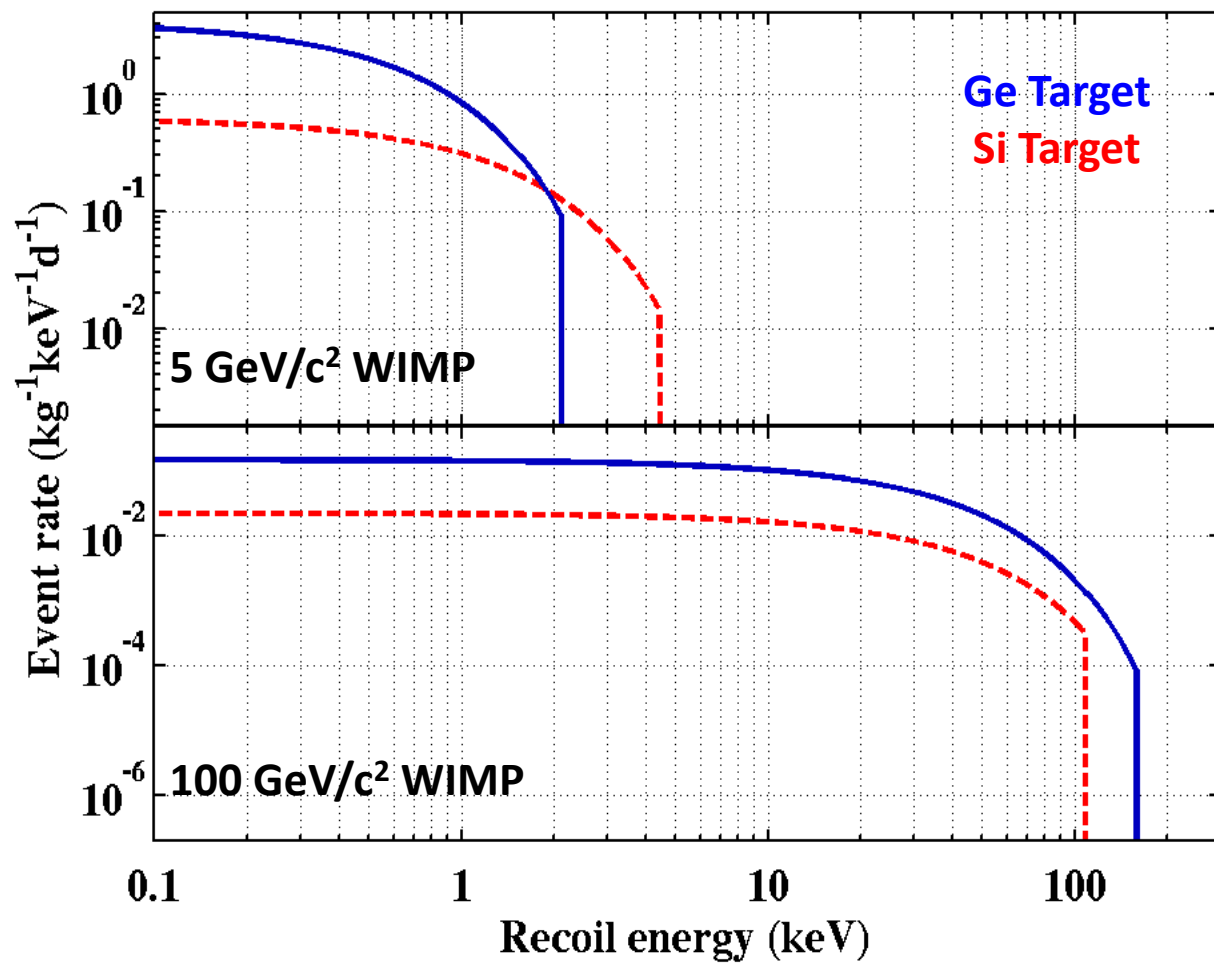
$$R_0 < 1 \text{ соб./кг/год}$$

Масса  
10 кг – 1000 кг

$$\text{Фон} \rightarrow 0$$

Эффективная защита,  
Подземная лаборатория,  
Отбор материалов, ...

$$\sigma = 1 \times 10^{-41} \text{ cm}^2, v_{\text{escape}} = 544 \text{ km/s}$$



Что создает Фон:

- Космические лучи и активация
- Естественная радиоактивность материалов и стен (горной породы)
- Естественная и техногенная радиация в пылинках
- Радиоактивные газы в воздухе, например радон
- . . .



## Подавление фона/ зачем нужны подземные лаборатории?

Космические лучи включают все элементы

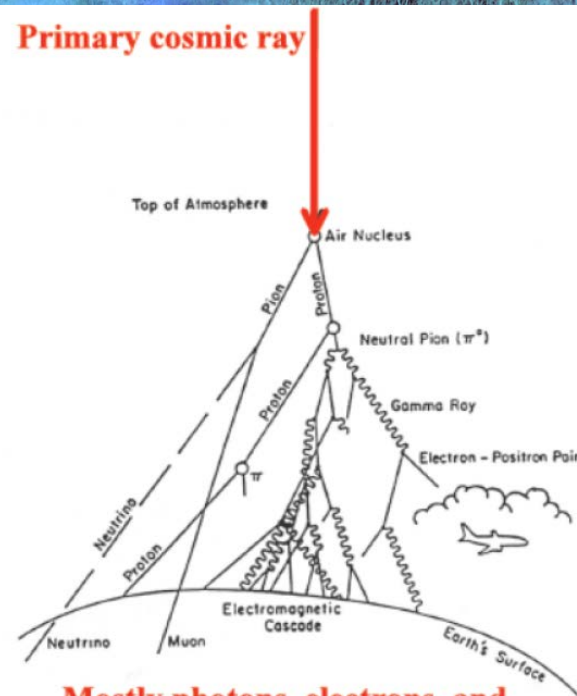
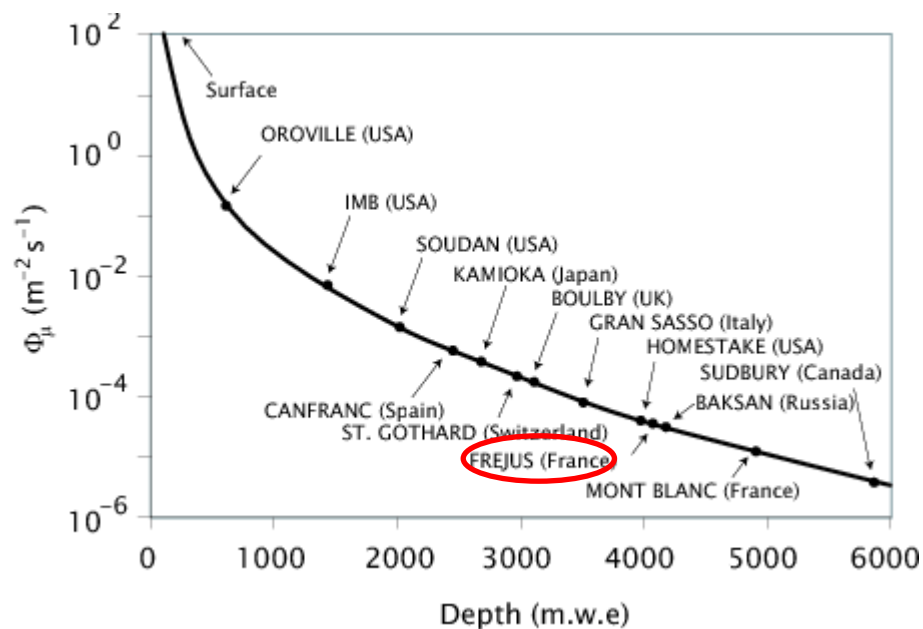
~ 89% протоны, ~ 10% ядра гелия

~1% более тяжелые элементы (C, O, Si, ...)

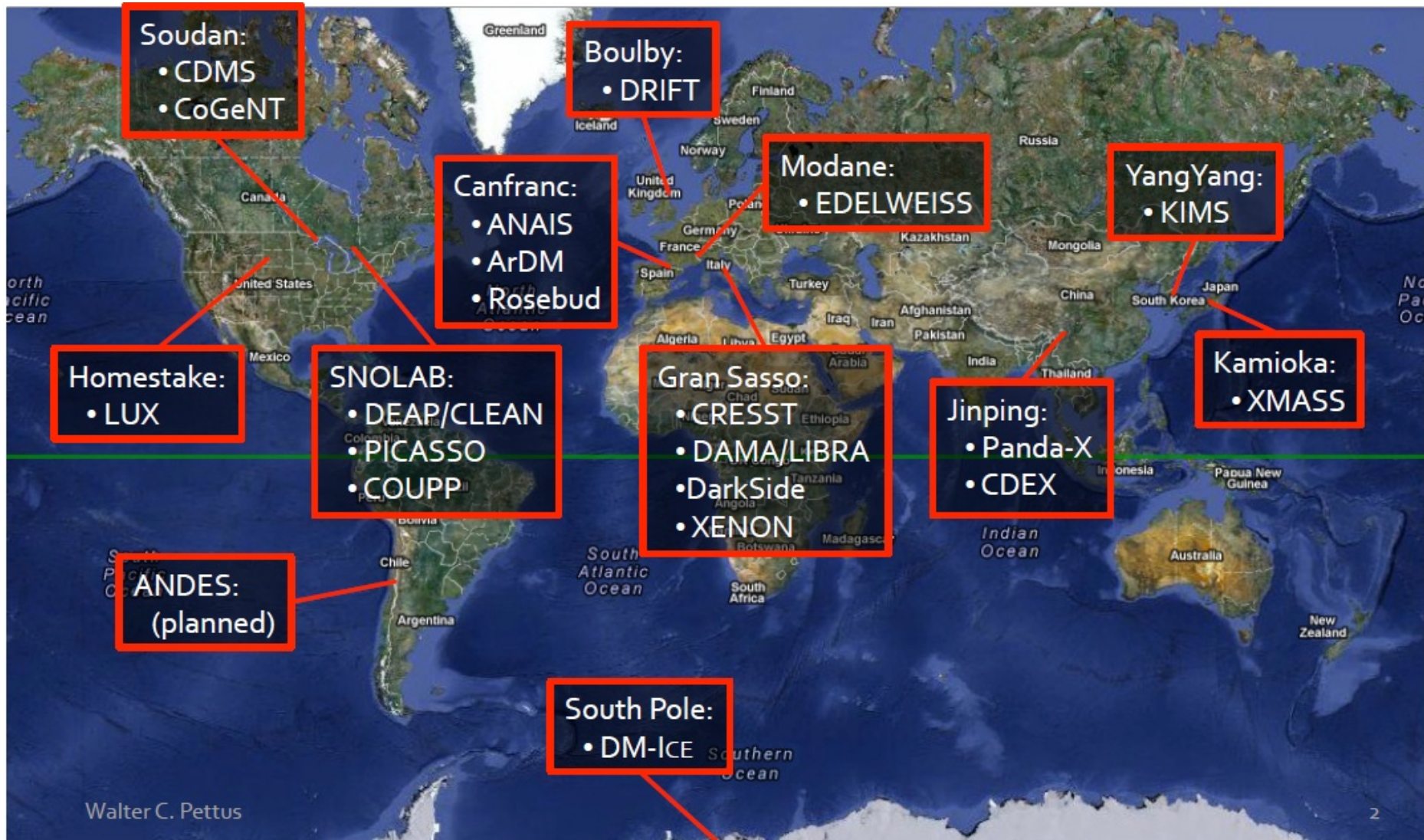
- На уровне моря, в результате взаимодействия с воздухом, остаются в основном мюоны с средней энергией около 4 ГэВ.
- Мюоны, взаимодействуя с веществом (воздух, горная порода, материалы зданий, материалы установки, детекторы), **производят нейтроны**.
- Для эффективной защиты от космического излучения необходимо проводить измерения в глубоких подземных лабораториях.



Primary cosmic ray



Mostly photons, electrons and muons at Earth's surface



## Естественная радиоактивность

### Высокая проникающая способность

Дополнительные трудности – радиоактивные газы в воздухе (Rn, Kr, Ar)

Связанные с этим проблемы – дочерние продукты радона,  $^{14}\text{C}$ , ...

- Необходимы радиоактивно-чистые материалы (отбор, очистка, чистые комнаты, анти-радоновые фабрики, ...).
- Защита
- Методы дискриминации фоновых событий



## Отбор низкорadioактивных материалов

- Используются различные методики, наиболее распространенная - низкофоновые детекторы с высокой эффективностью. Как правило, расположенные в подземной лаборатории. Для современных экспериментов, для многих материалов, только пределы радиоактивного уровня могут быть установлены.
- Прототип установки
- Нахождение проблем и их устранение в ходе эксперимента (фазы 1, 2, 3 ...)





$\gamma$  - использование многослойной защиты, включающей материалы, содержащие элементы с высоким  $Z$

Необходимо учитывать:

- собственную радиоактивность материалов защиты, включая вторичные процессы (активация, проникновение радона, ...);
- простоту в обработке, сборке и эксплуатации;
- цену;
- ...

## Радон

- Естественная радиоактивность ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ )
- $^{222}\text{Rn}$  доминирует  $\Rightarrow$  1-1000 Бк/м<sup>3</sup> в воздухе

(зависит от времени года, места, почвы, ...)

## Криптон

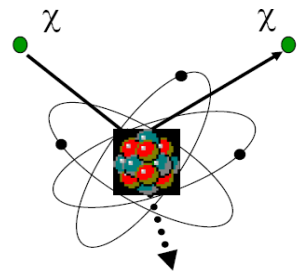
- Продукт ядерной энергетики
- $^{85}\text{Kr}$   $\Rightarrow$  1 Бк/м<sup>3</sup> в воздухе (медленно растет в последние несколько десятилетий)

Другие газы (Тритий, Ar, газы, содержащие углерод ( $^{14}\text{C}$ ), ...)

Необходимость принимать их во внимание зависит от конкретного эксперимента ...

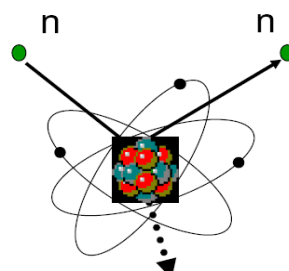
## Источники нейтронов:

- U/Th  
SF и  $(\alpha, n)$  реакции
- Нейтроны от мюонов

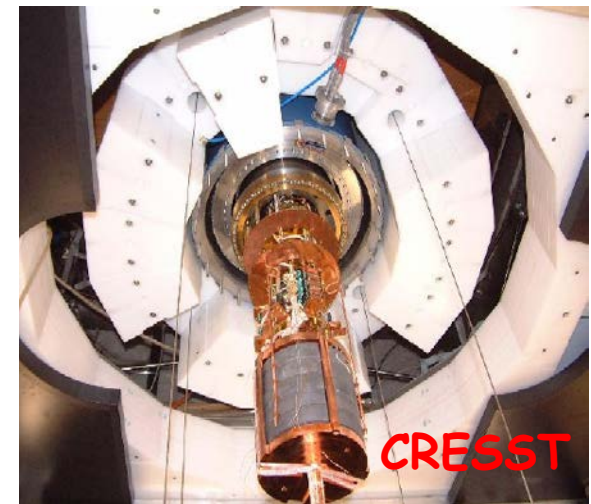


elastic scattering

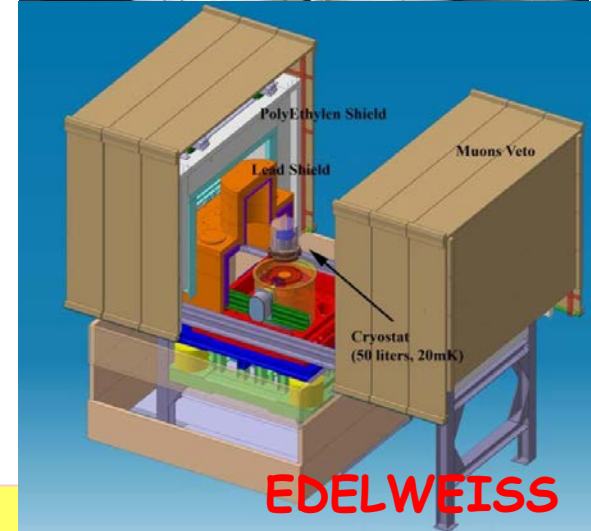
$$\begin{aligned} v(\chi) &\sim 300 \text{ km/s} \\ m(\chi) &\sim 70 \text{ GeV} \\ \rightarrow E_{\text{rec, max}} &\sim 35 \text{ keV} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} E_{\text{rec, max}} &\sim 35 \text{ keV} \\ \rightarrow E(n) &\sim 0.6 \text{ MeV} \end{aligned}$$



CRESST



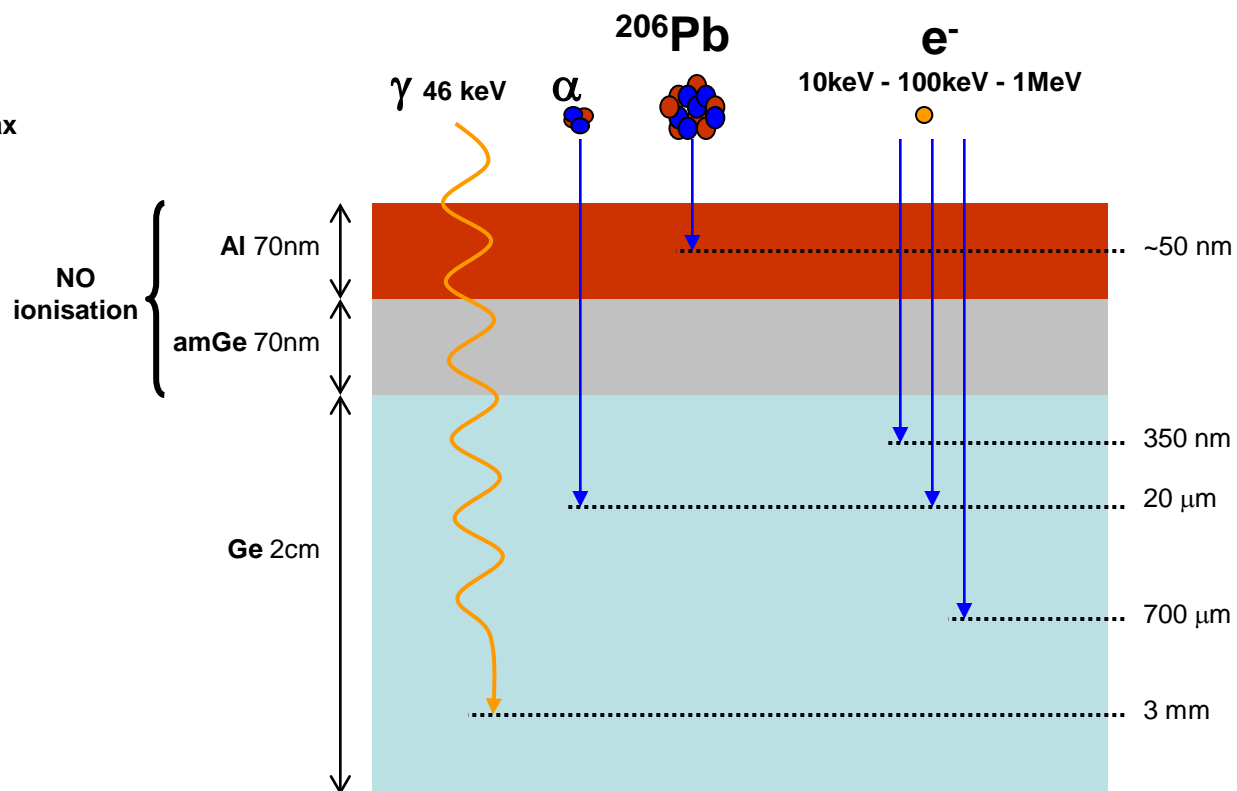
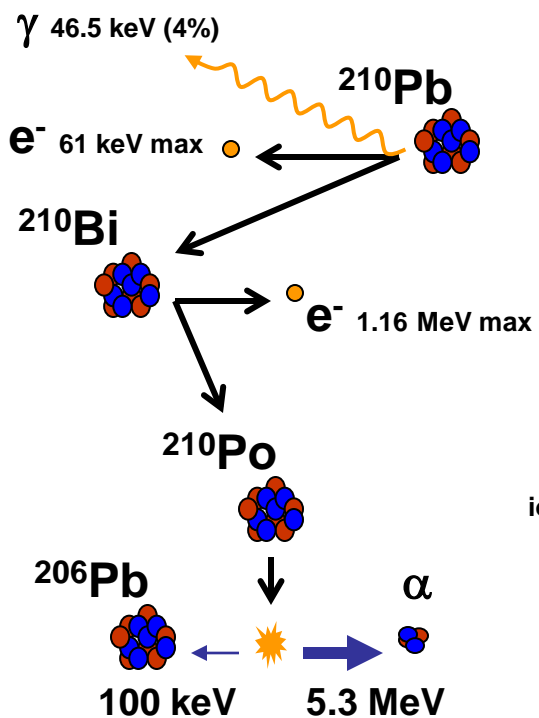
EDELWEISS

## Методы борьбы с нейтронами

- 1) Подземная лаборатория (подавление на 4+ порядка)
- 2) Отбор материалов
- 3) Вето система
- 4) Нейтронная пассивная защита
- 5) Мульти-детекторная сборка

# События на поверхности

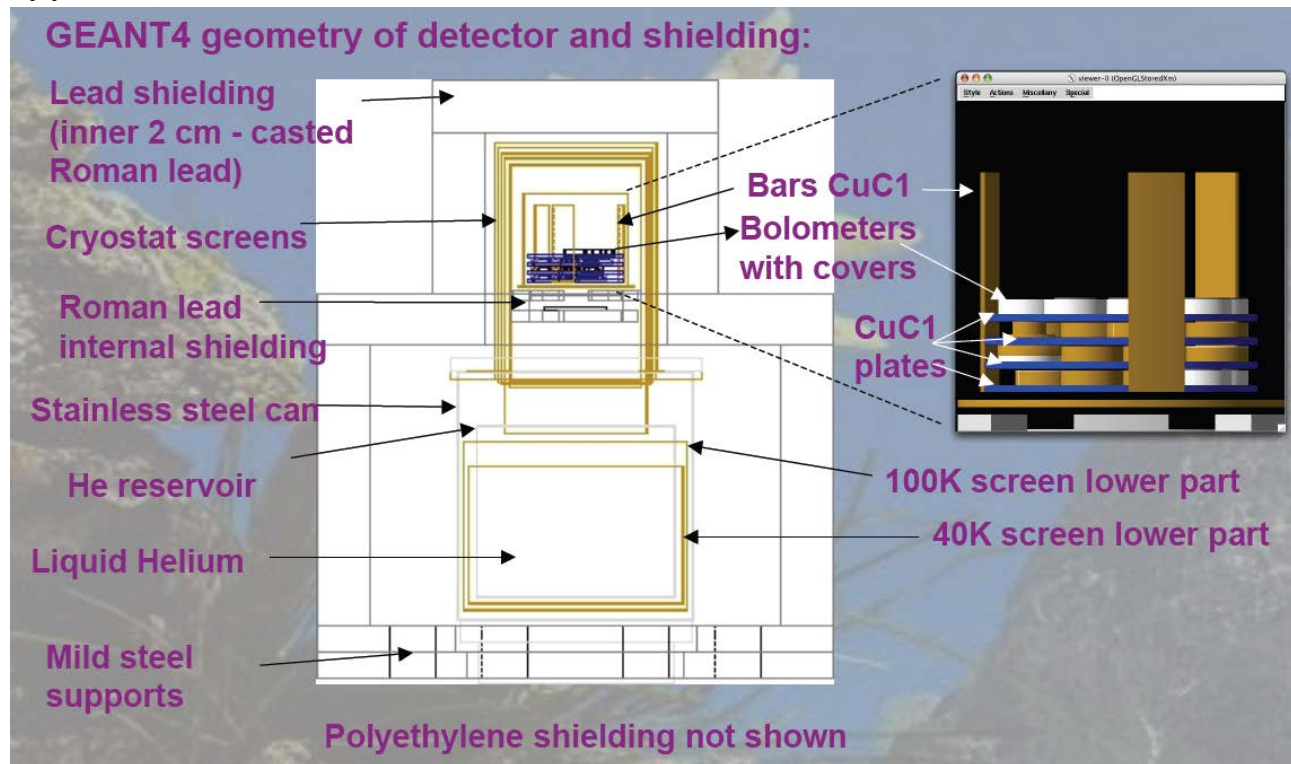
Источник таких событий: например  $^{210}\text{Pb}$



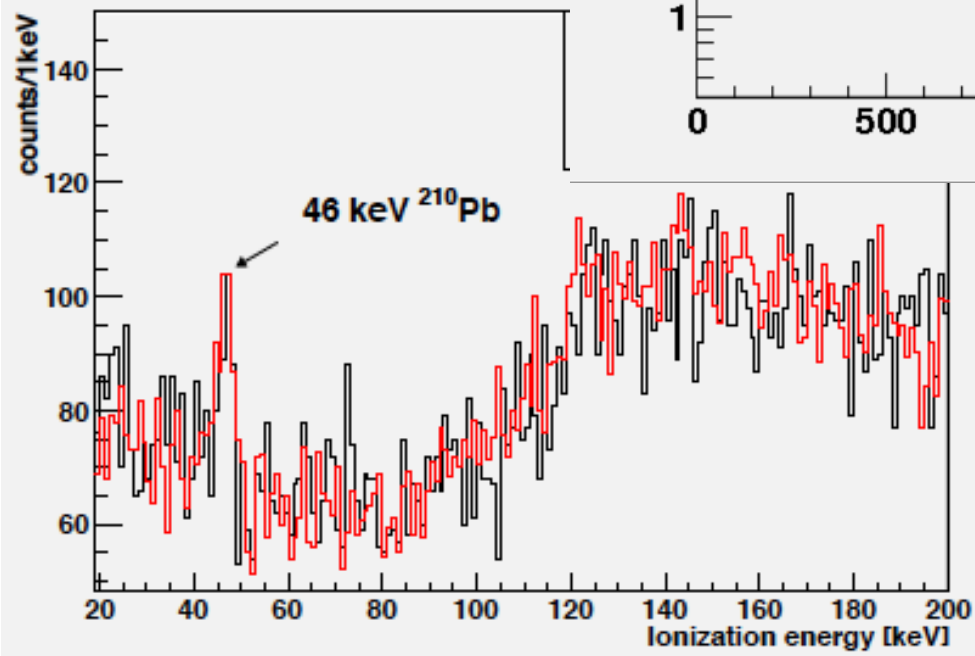
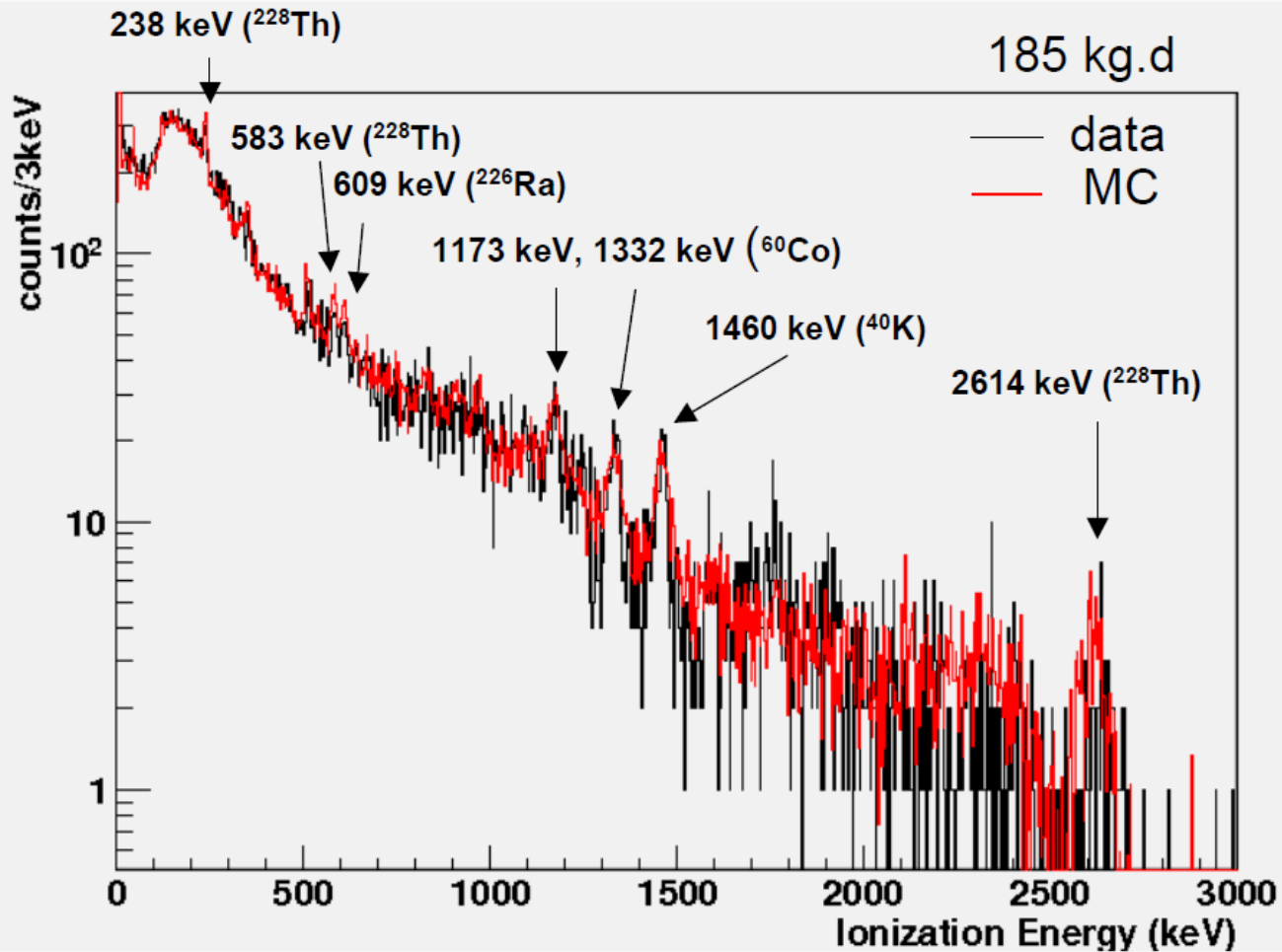


## Модель фона / экспериментальный фон

- Модель фона позволяет оценить возможность проведения эксперимента
- Проблемы: Для сложных установок зачастую сложно создать точную модель, радиоактивные загрязнения не всех частей могут быть хорошо известны, сечения для низких энергий могут иметь большую ошибку
- Зачем нужно: достоверность эксперимента / сравнение модели фона и экспериментальных данных позволяет оценивать некоторые систематические неопределенности



$\gamma$ -фон  
(EDELWEISS)

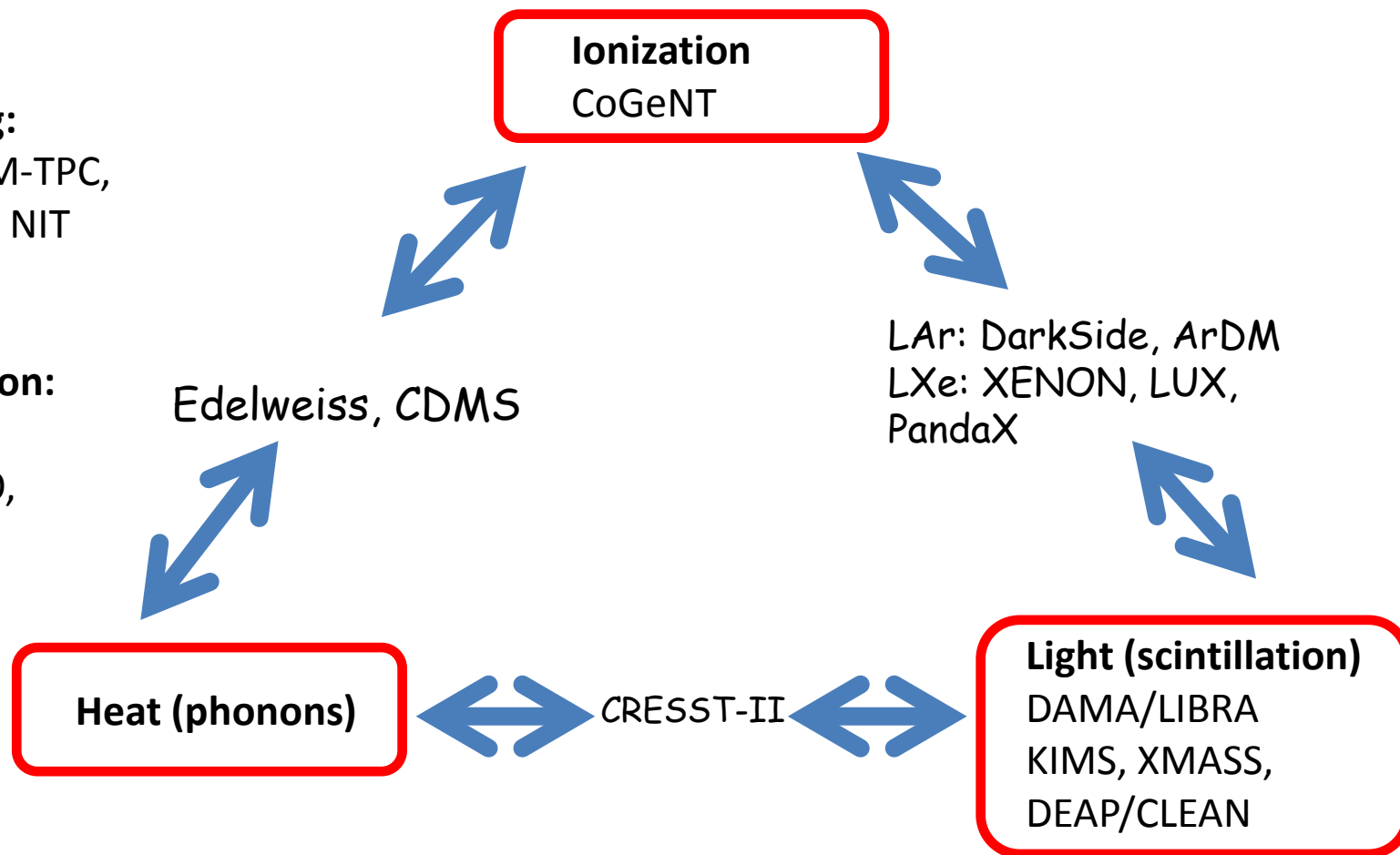


# Основные подходы к прямому поиску частиц темной материи:

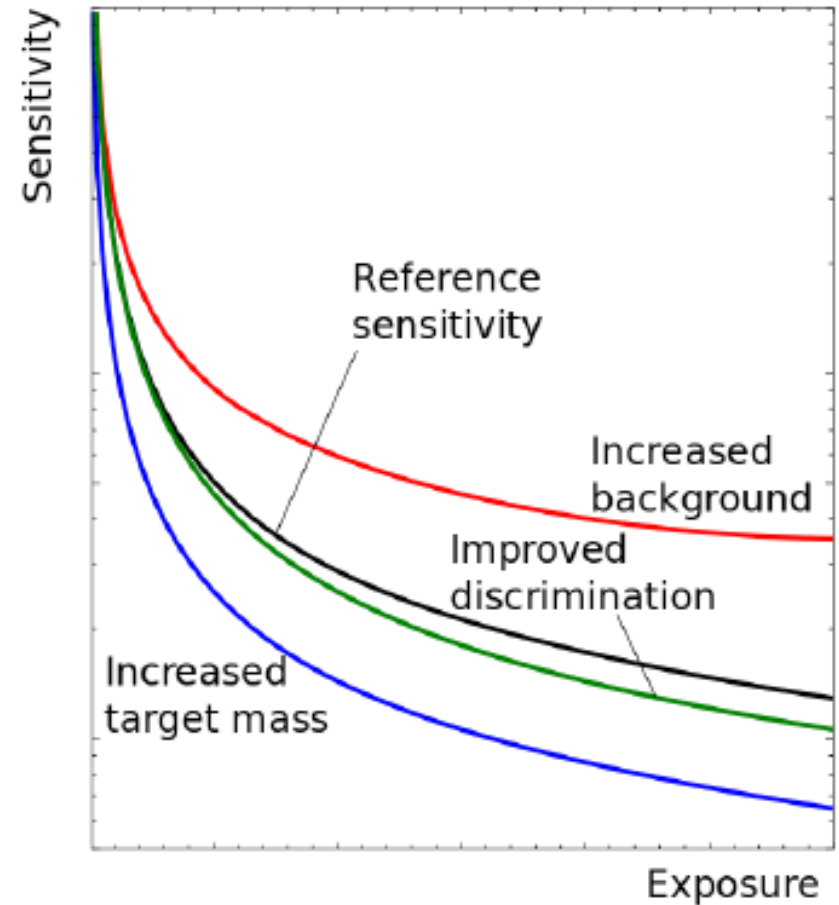
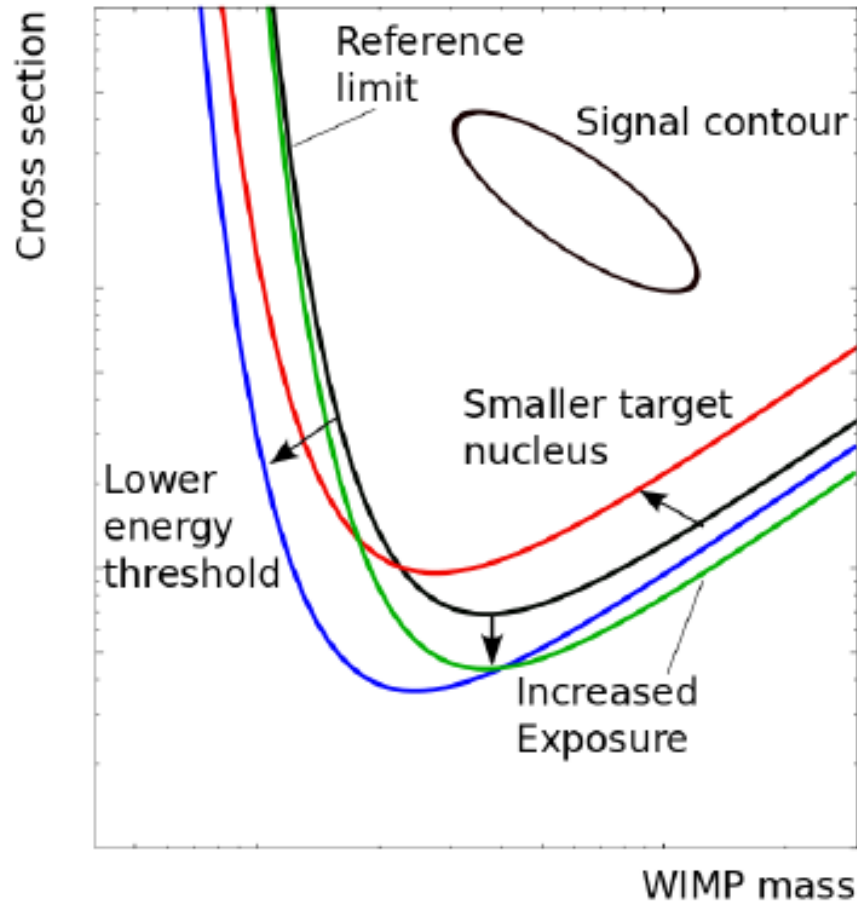
Cryogenic (Ge, Si, ...)  
Solid Scintillator (NaI, CsI)  
Noble Liquids (LXe, LAr)  
Others (bubble formation, gas-tracking)

**Tracking:**  
Drift, DM-TPC,  
MIMAC, NIT

**Bubble  
Formation:**  
COUPP,  
PICASSO,  
PICO



## Как лучше искать частицы темной материи:



arxiv:1509.08767

*Xe, Ar:* масса, тяжелые элементы, низкий фон

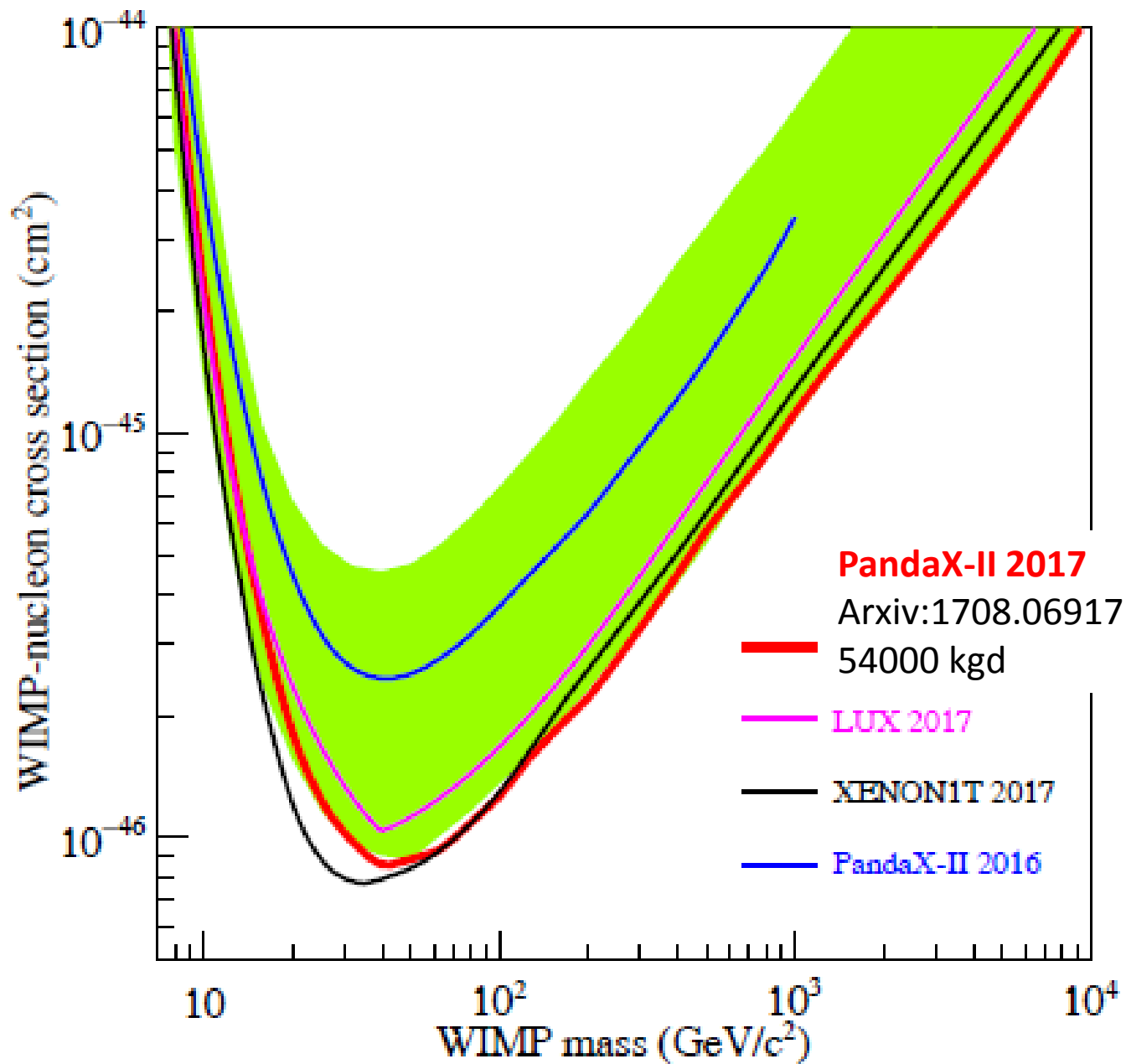
→ идеальны для масс WIMP выше  $10 \text{ ГэВ}/c^2$

*Криогенные эксперименты (Ge, Si, ...):* энергетическое разрешение и низкий порог

→ идеальны для масс WIMP меньше  $10 \text{ ГэВ}/c^2$

# Детекторы на основе сжиженных благородных газов

- Хе: большое A;
- Ar: низкая стоимость
- Высокая степень очистки
  - $^{39}\text{Ar}$  (1Bq/kg): требуется уменьшение  $>10^7$  для  $10^{-42}$  см<sup>2</sup>,
  - или обедненный Ar (DarkSide)
- Борьба с фоном
  - Self-shielding в большом объеме
  - Отношение (prompt scintillation)/(ionization)
  - PSD





 **CSNSM** CNRS/IN2P3

 **ipnl** CNRS/IN2P3

 **NEEL** institut CNRS/INP

 **LABORATOIRE DE PHOTONIQUE ET DE NANOSTRUCTURES** CNRS

 **Irfu** CEA/IRFU

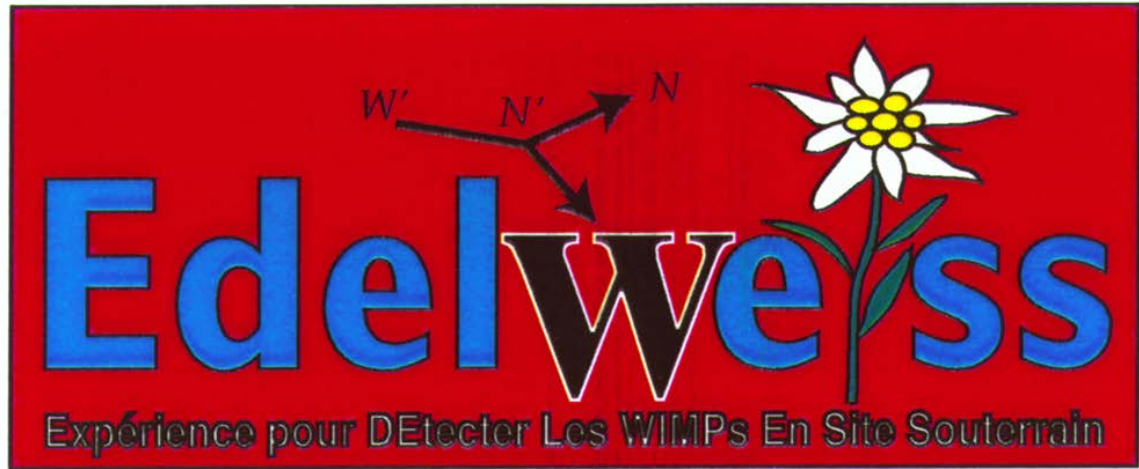
 **IRAMIS** CEA/IRAMIS

 **KIT** IKP  
EKP  
IPE  
Karlsruher Institut für Technologie

 **JINR DUBNA**

 **UNIVERSITY OF OXFORD** Univ. OXFORD

 **The University Of Sheffield.** Univ. SHEFFIELD



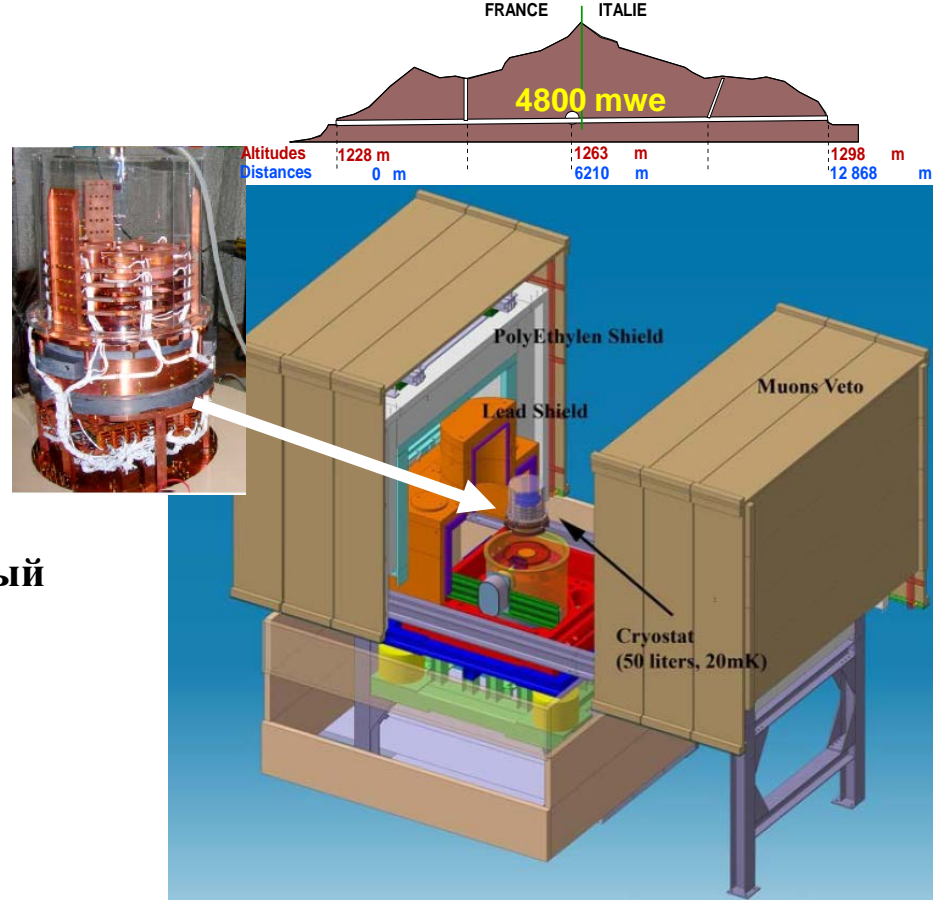
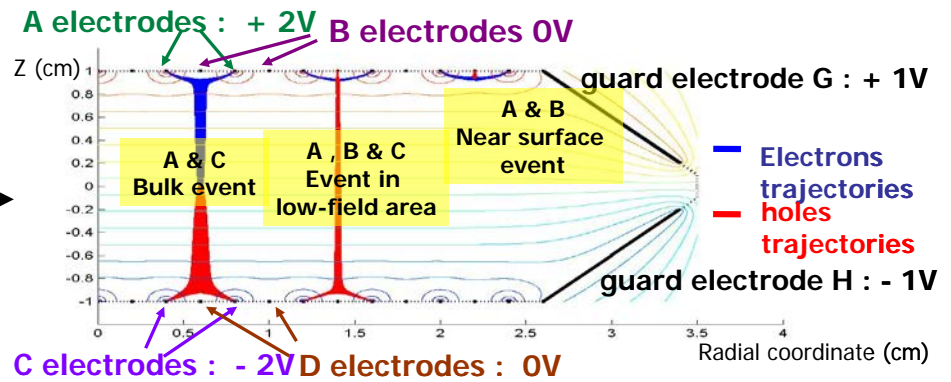
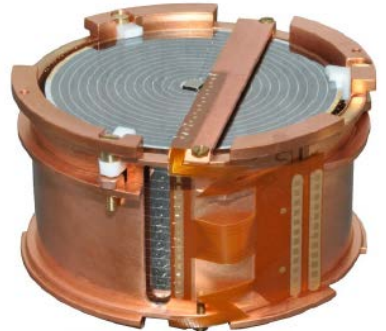
# Основные данные об эксперименте

- Германиевые детекторы-болометры**
- Традиционные методы подавления фона:**  
Подземная лаборатория LSM  
Многослойная защита + активное veto  
Отбор материалов  
Непрерывный контроль уровня радона  
Непрерывный мониторинг нейтронного потока

- Специальные методы подавления фона**  
2 канала измерений: фононный и ионизационный

Отношение  $E_{ionization}/E_{recoil}$   
 =1 для электронов  
 $\approx 0.3$  для ядер отдачи  
 ⇒ Возможность отобрать события – кандидаты WIMP  
 ⇒ Подавление  $\gamma$ -фона > 99.999%

Детекторы со специальной схемой электродов, позволяющей проводить активный отбор поверхностного фона (событий с неполным сбором заряда)





# Научная программа

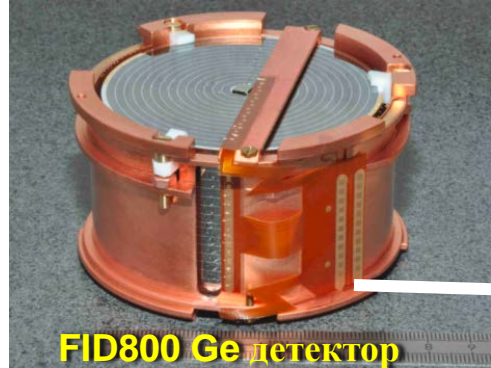
**EDELWEISS-II (2005-2011):** 10 x 400 г детекторов “ID” дизайна (interleaved electrodes),  
Достигнутая чувствительность  $4.4 \times 10^{-43} \text{ см}^2$

**Преимущества:** Отработана ID технология, получен конкурентно-способный результат. Совместно с CDMS – лучший результат на германиевых детекторах.

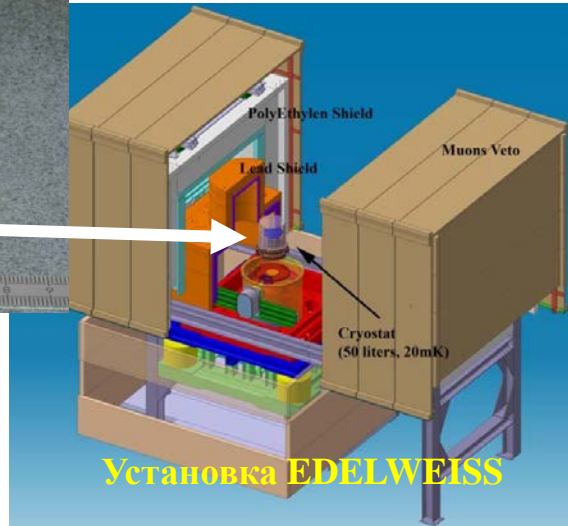
**Ограничения:** Необходимо дальнейшее подавление  $\gamma$  событий принаикающих в чувствительный объем, необходимо улучшить защиту от нейтронов.

**EDELWEISS-III (2012-2018):** FID800 Ge детекторов, чувствительный объем каждого детектора x4 (более 600 г). Все поверхности покрыты специальными электродами. Улучшенное подавление  $\gamma$ -фона. Дополнительная нейтронная защита (дополнительное подавление x10). Разрешение ионизационных и фоновых каналов улучшены на >30%.

**Смещение интереса в область легких WIMP**

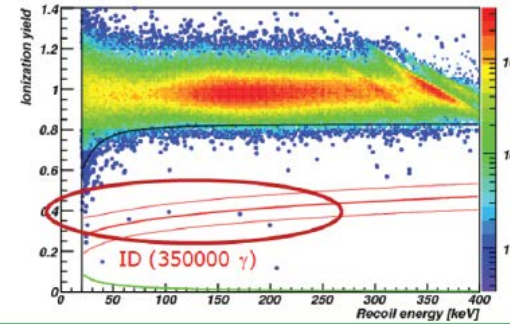
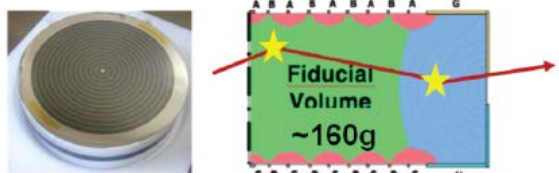


FID800 Ge детектор

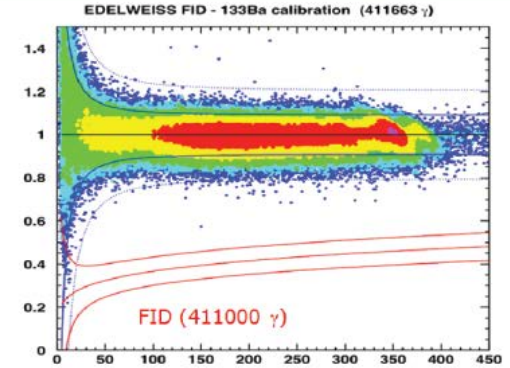
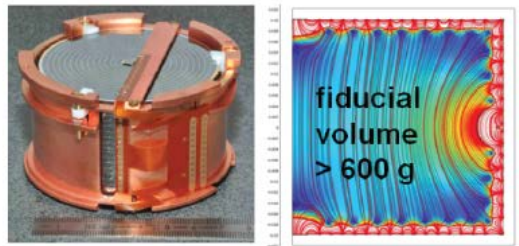


Установка EDELWEISS

EDELWEISS-II  
ID 400g with 10x 160g fiducial mass

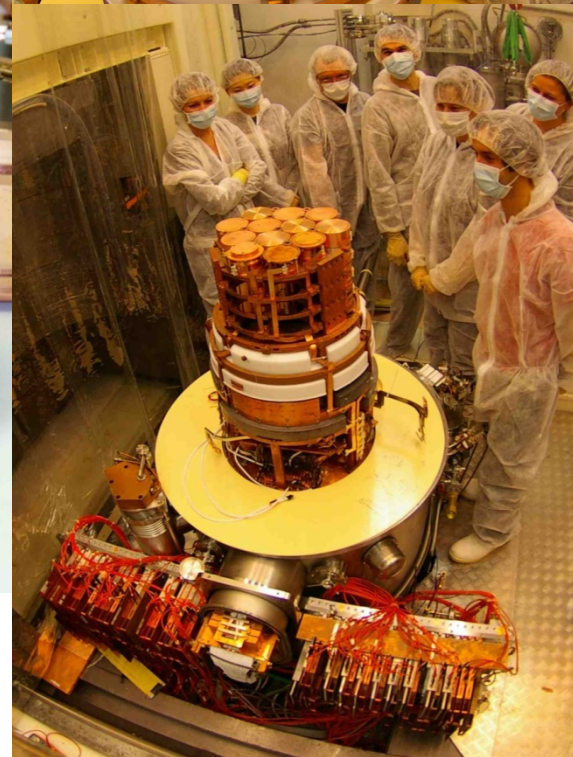


EDELWEISS-III  
FID 800g with 40x ~600g fiducial mass

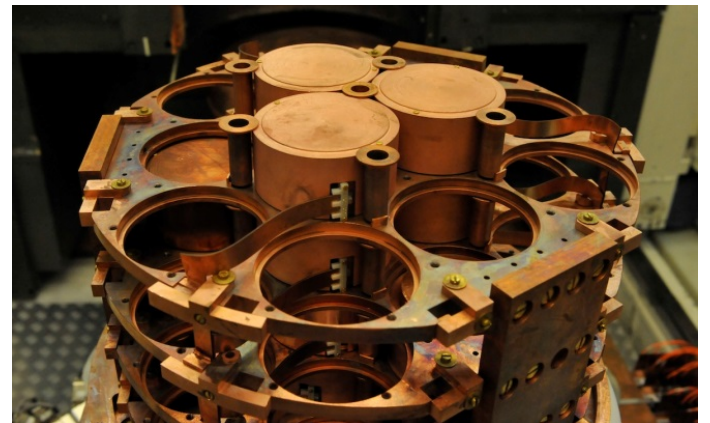
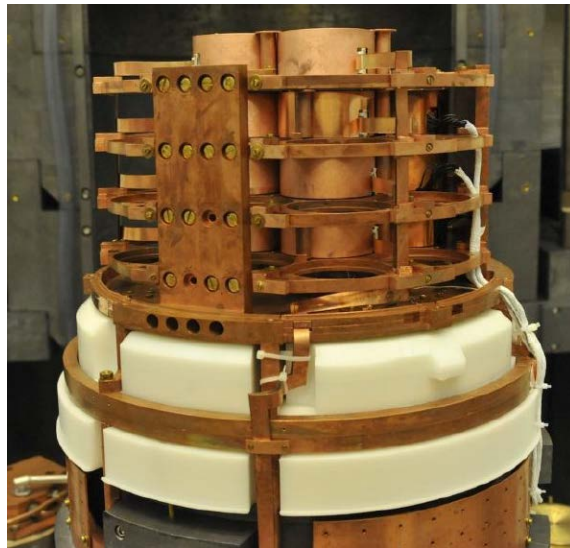
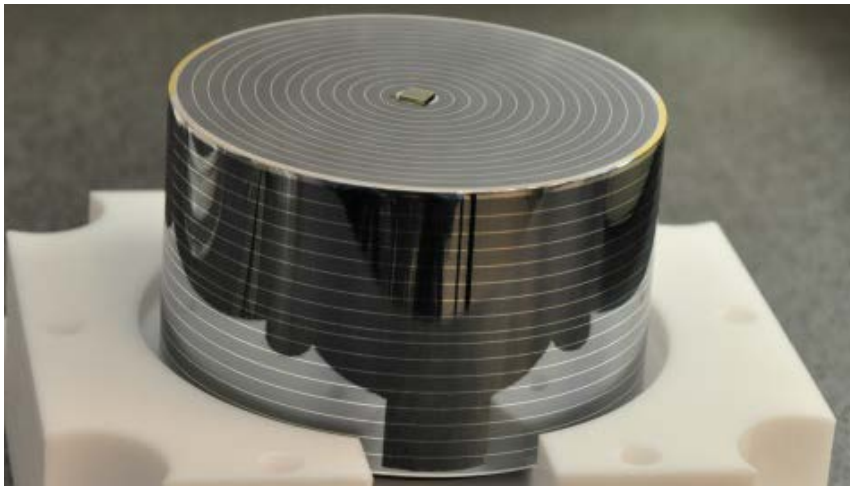




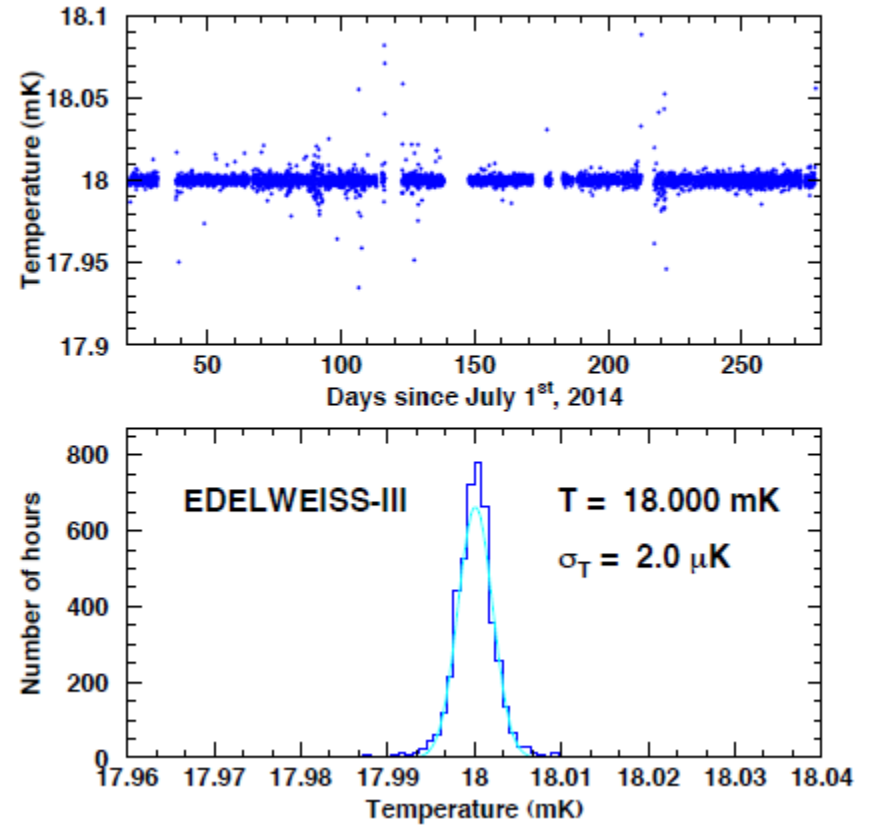
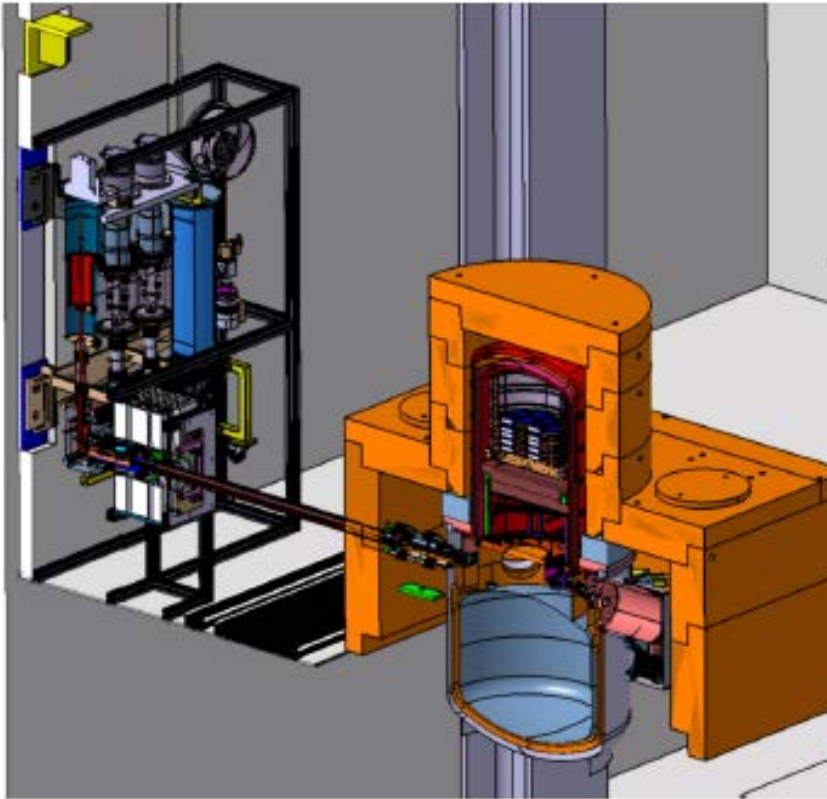
**FID800 детекторы EDELWEISS,  
текущая фаза эксперимента**



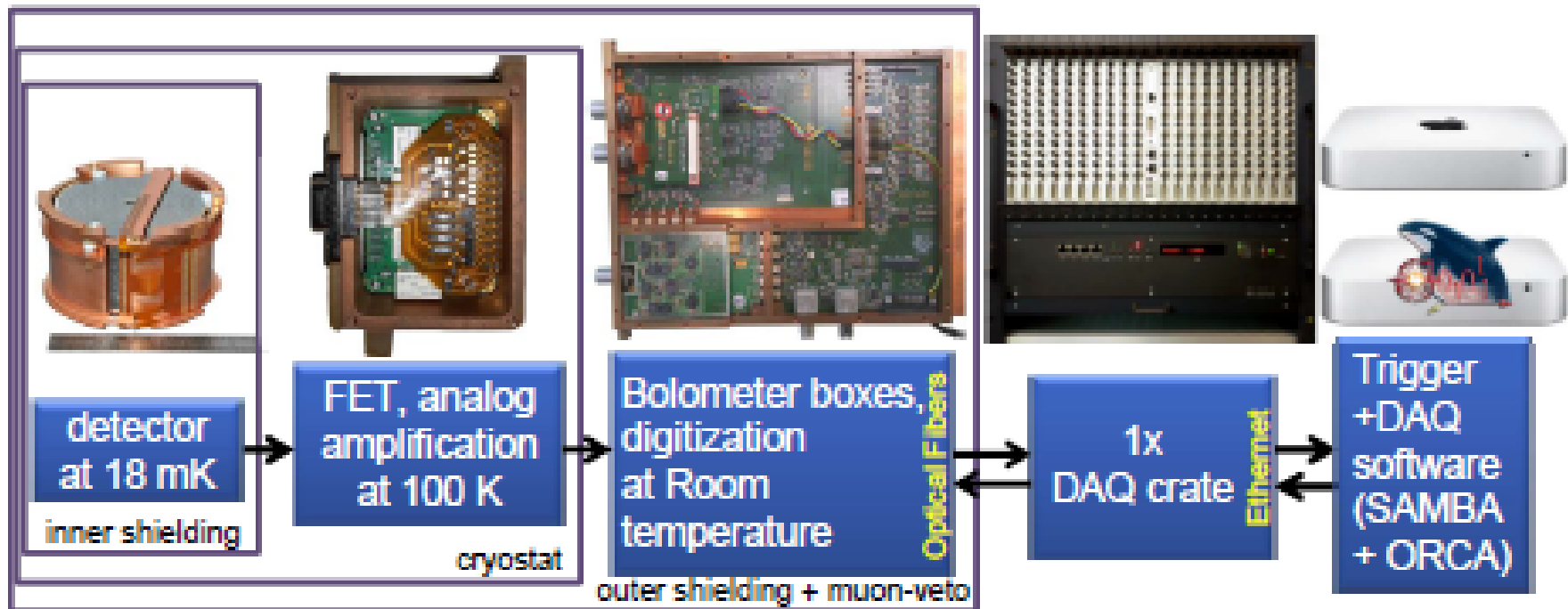






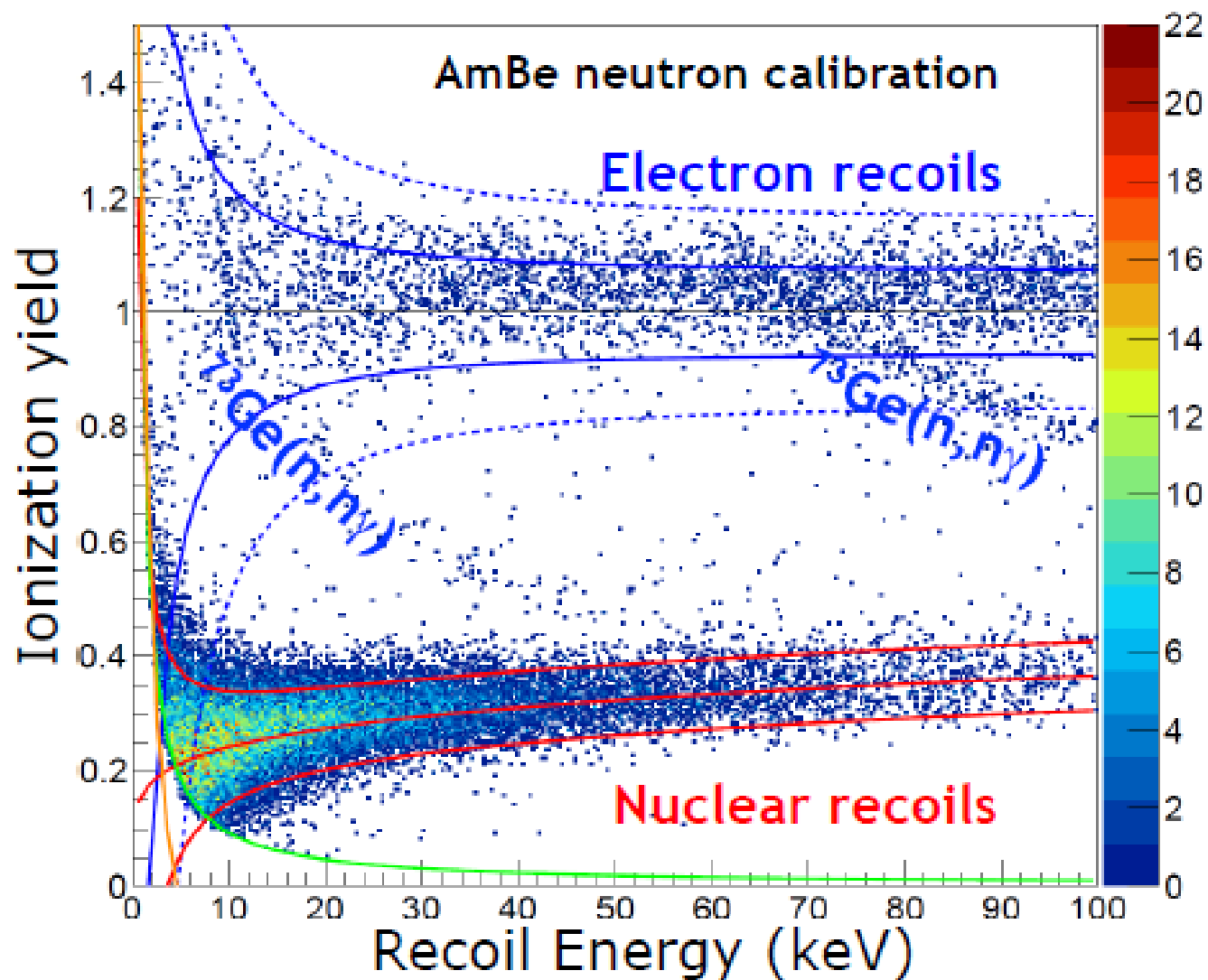


Криогенная система EDELWEISS



Усиление, оцифровка, набор данных EDELWEISS

# Калибровки



## Gamma rejection

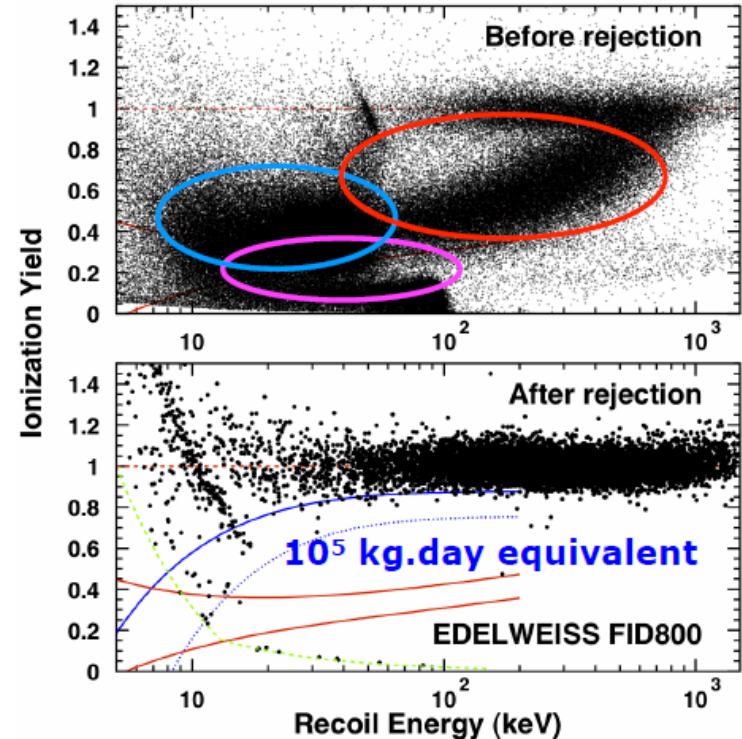
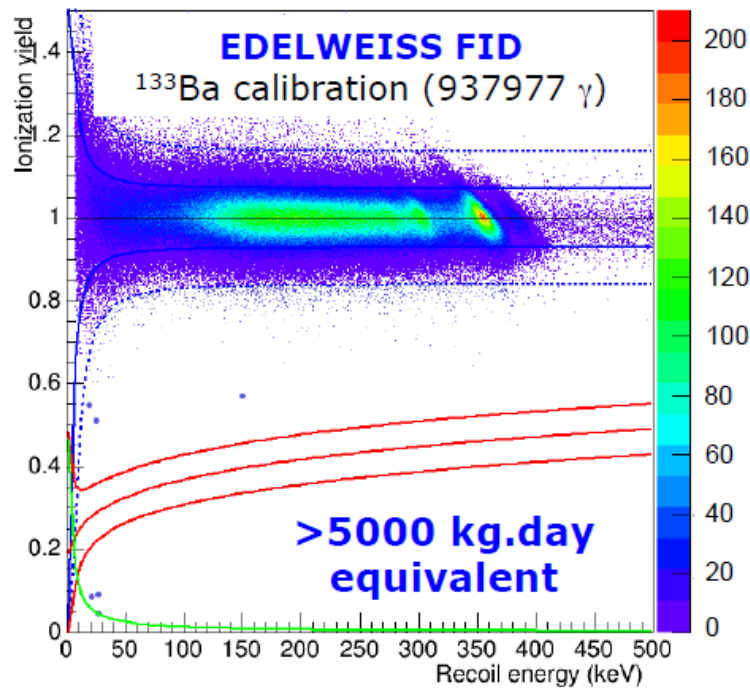
- $\gamma$  rejection factor:  $< 5.6 \times 10^{-6}$

[J Low Temp Phys (2012) 167: 1056-1062]

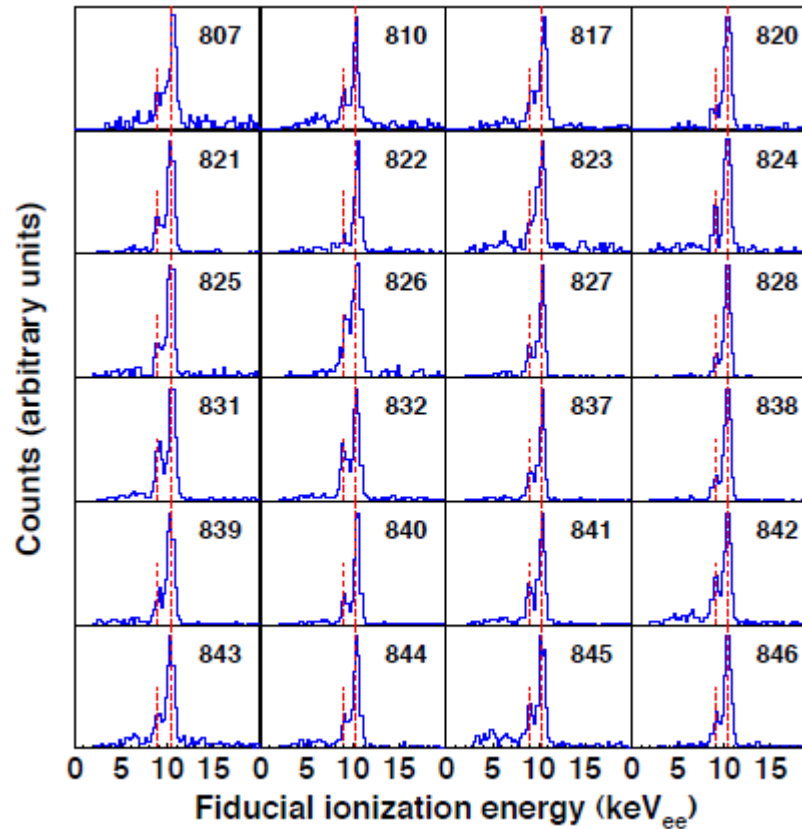
Updated now to  $< 2.5 \times 10^{-6}$  with additional detectors + statistics

- Surface evts rejection ( $^{210}\text{Pb} + ^{210}\text{Bi} \beta$ ,  $^{210}\text{Po} \alpha$ ,  $^{206}\text{Pb}$  recoils):  $< 4 \times 10^{-5}$

[J Low Temp Phys (2014) 176: 870-875]



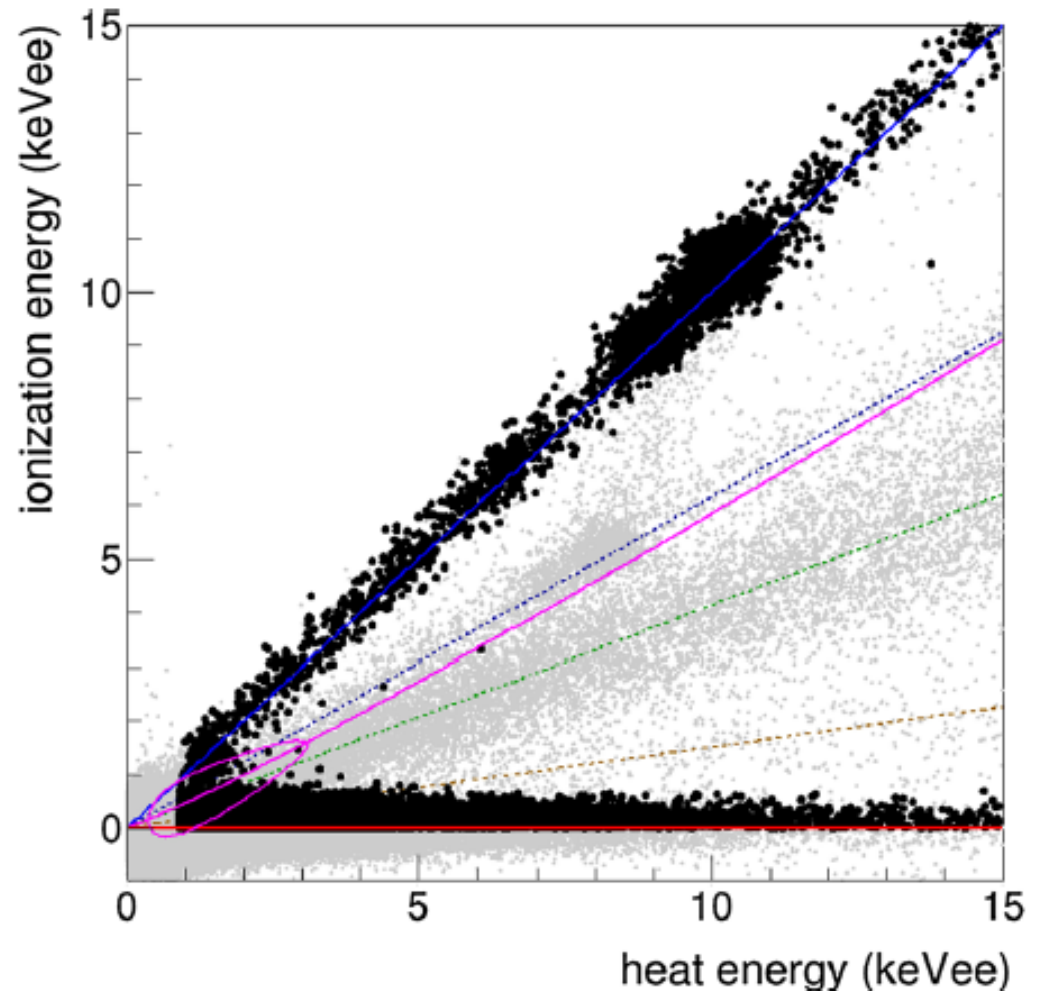
# Калибровки



Использование фона для постоянного контроля энергетической шкалы и чувствительного объема: космогенные пики 8.98 кэВ и 10.37 кэВ.

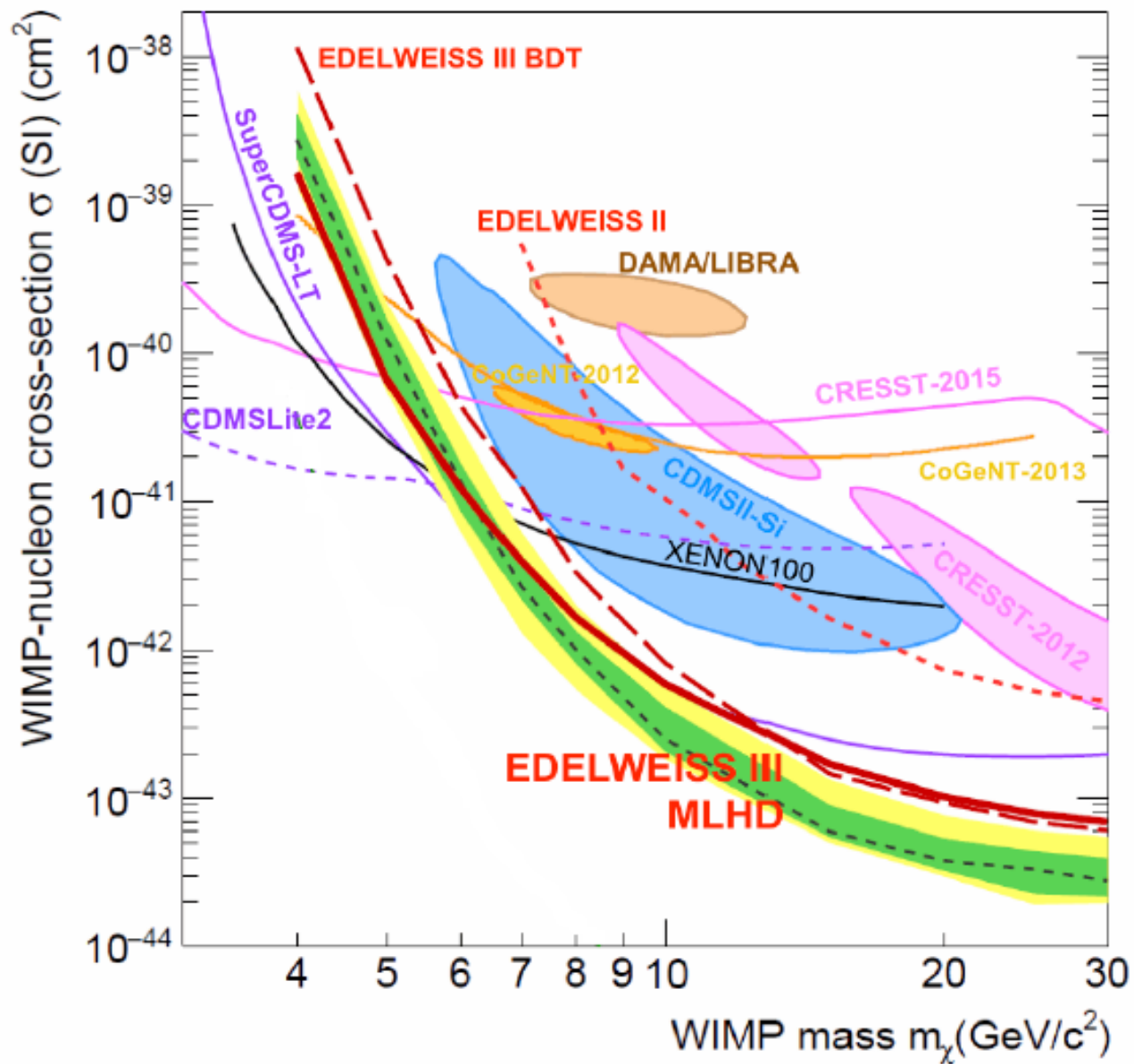


Зарегистрированные EDELWEISS-3 события в данных, соответствующих 500 кг. суток чувствительного объема, показаны черными точками в координатах ионизационная : тепловая энергии. События, отсеянные как результат выборки чувствительного объема показаны серыми точками. Область замкнутая розовой линией соответствует событиям WIMP с массой 10 ГэВ/с<sup>2</sup>.



Результаты,  
полученные  
экспериментом  
EDELWEISS после  
набора 500 кг. суток

В настоящее время  
больше 1500 кг. суток

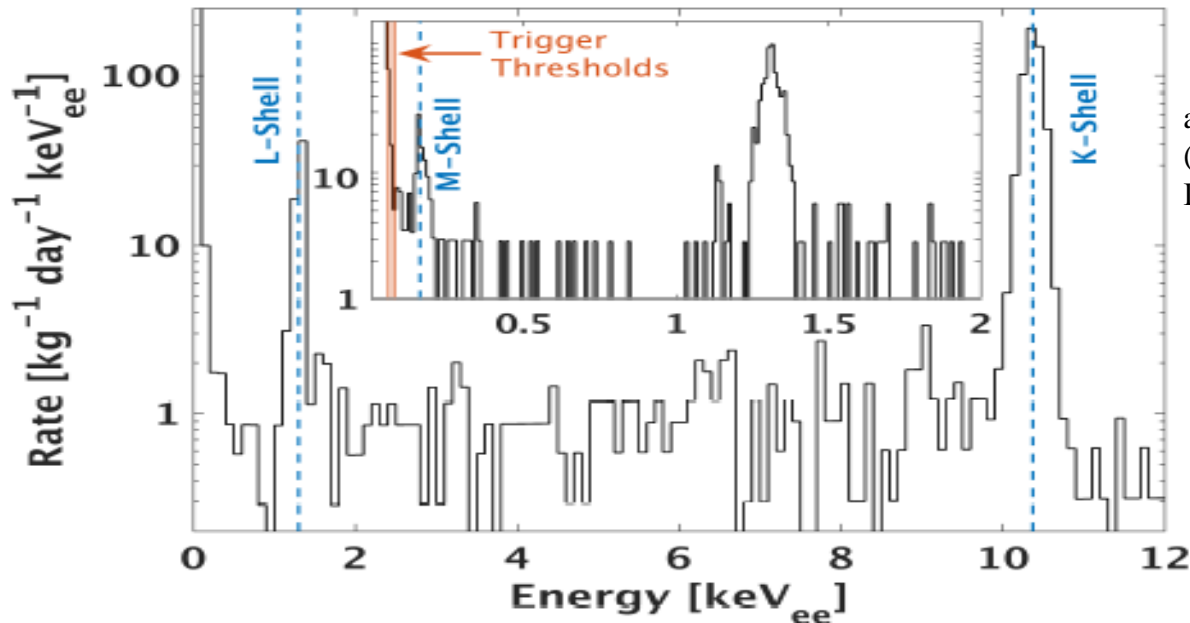
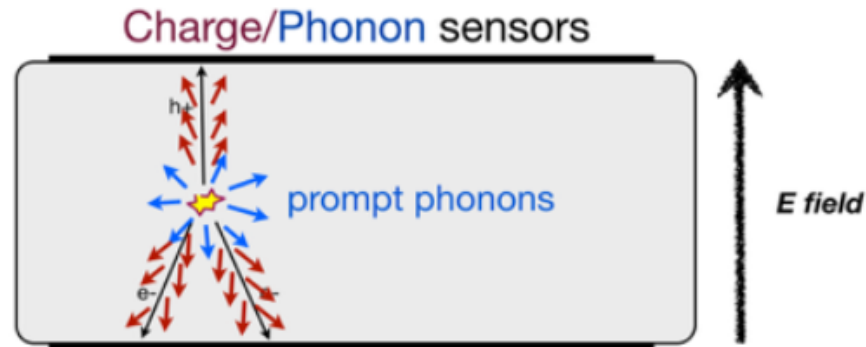


**EDELWEISS-LT**

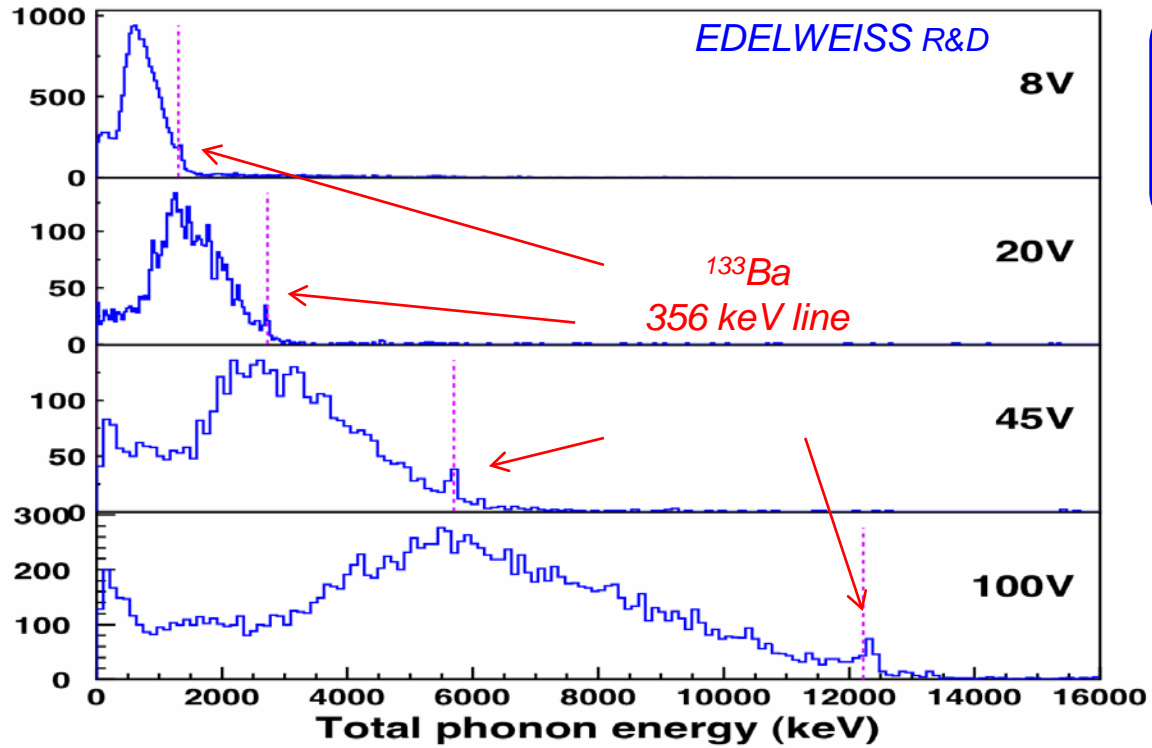
# EDELWEISS-LT: использование эффекта Неганова-Люка

Новый метод (усиление фонного сигнала из-за эффекта Неганова-Люка) для исследования области WIMP с массой  $< 10$  ГэВ/ $c^2$ .

$$E_t = E_r + \frac{1}{3 \text{ eV}} E_Q \Delta V$$

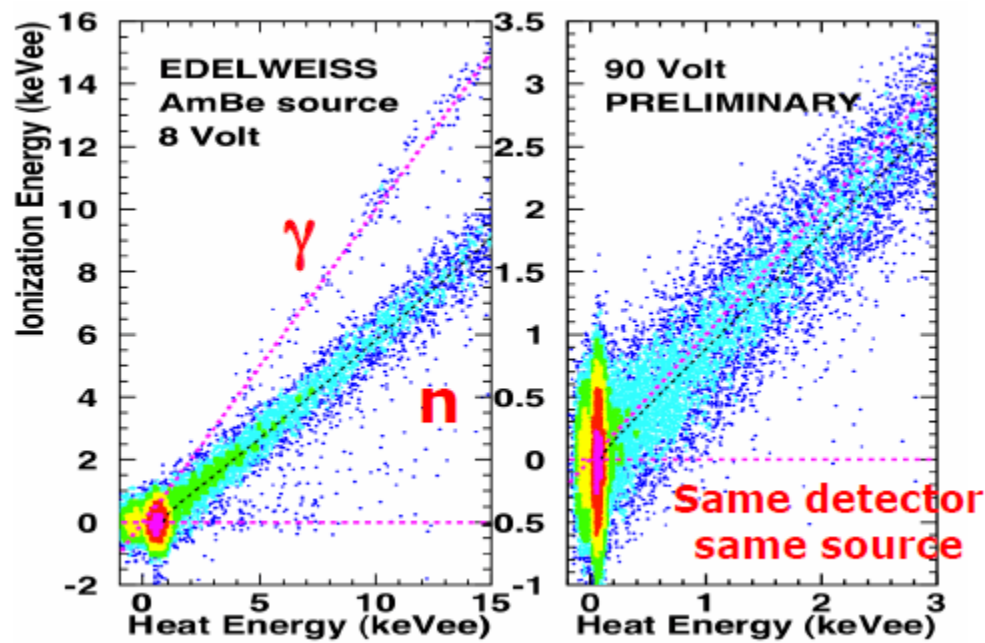
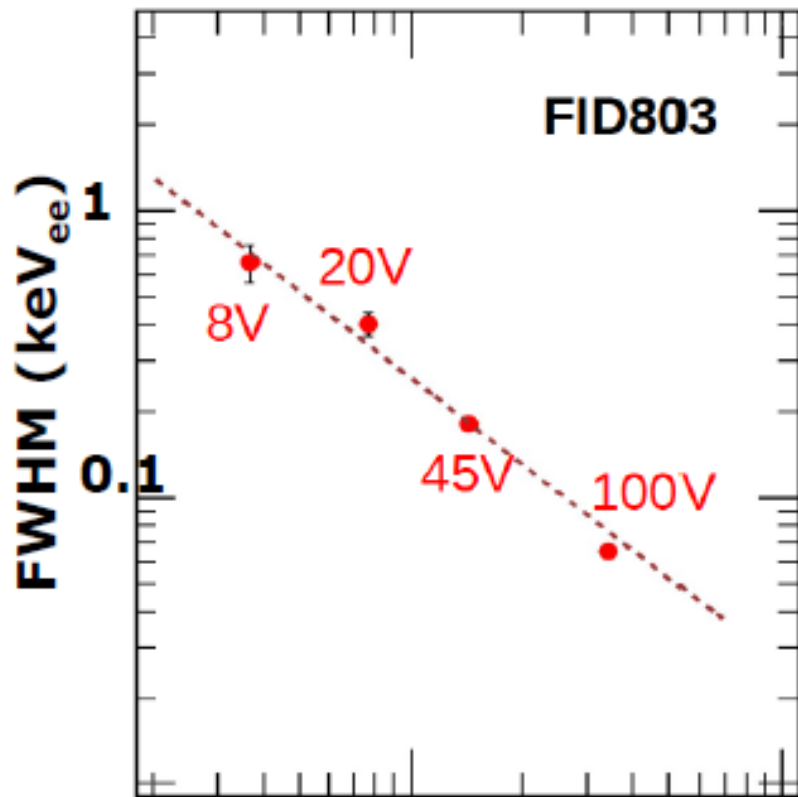


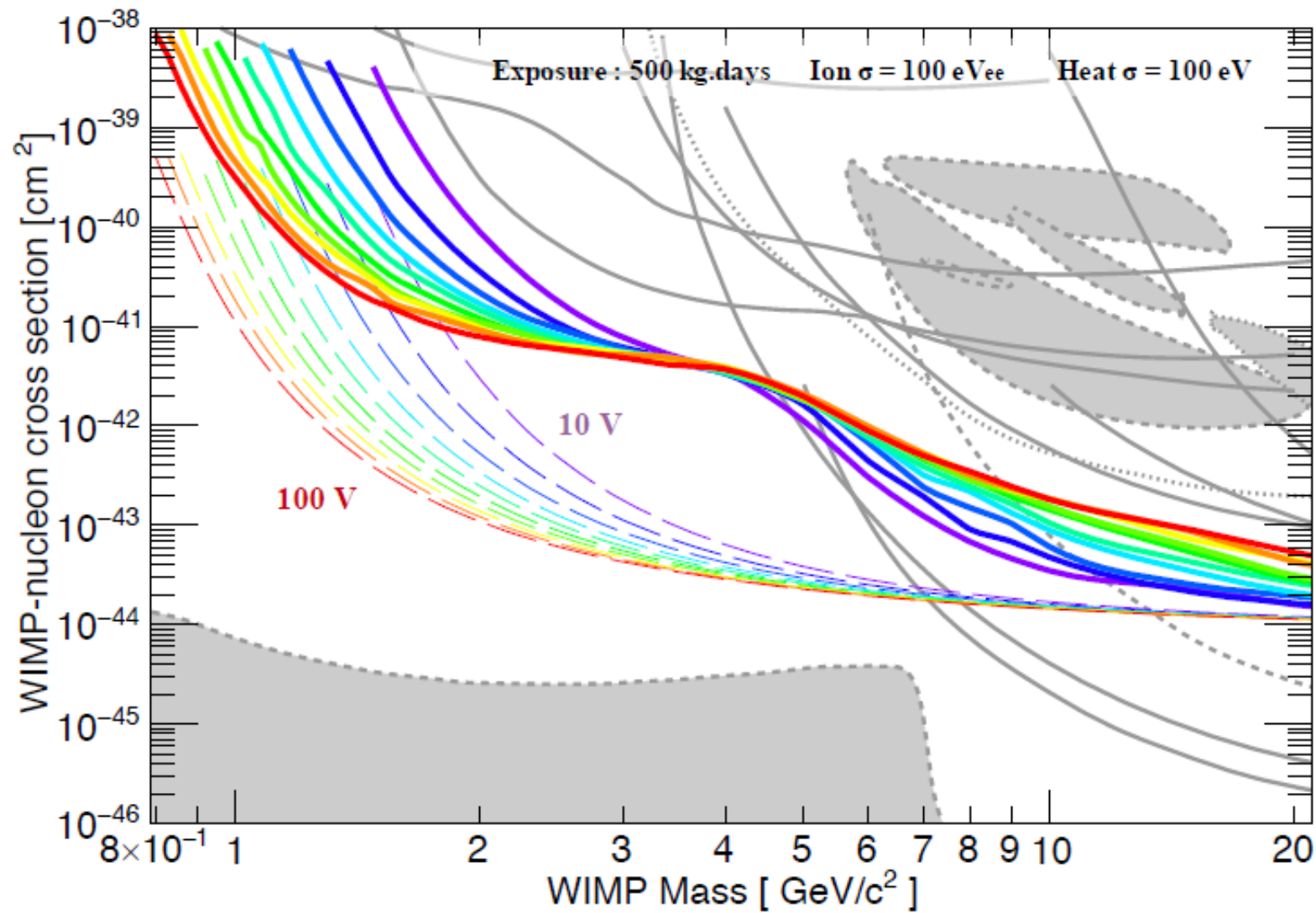
arXiv:1509.02448v2  
(CDMSlite 70 кг · дней,  
Получен порог 56 эВ



100V bias  
already  
achieved

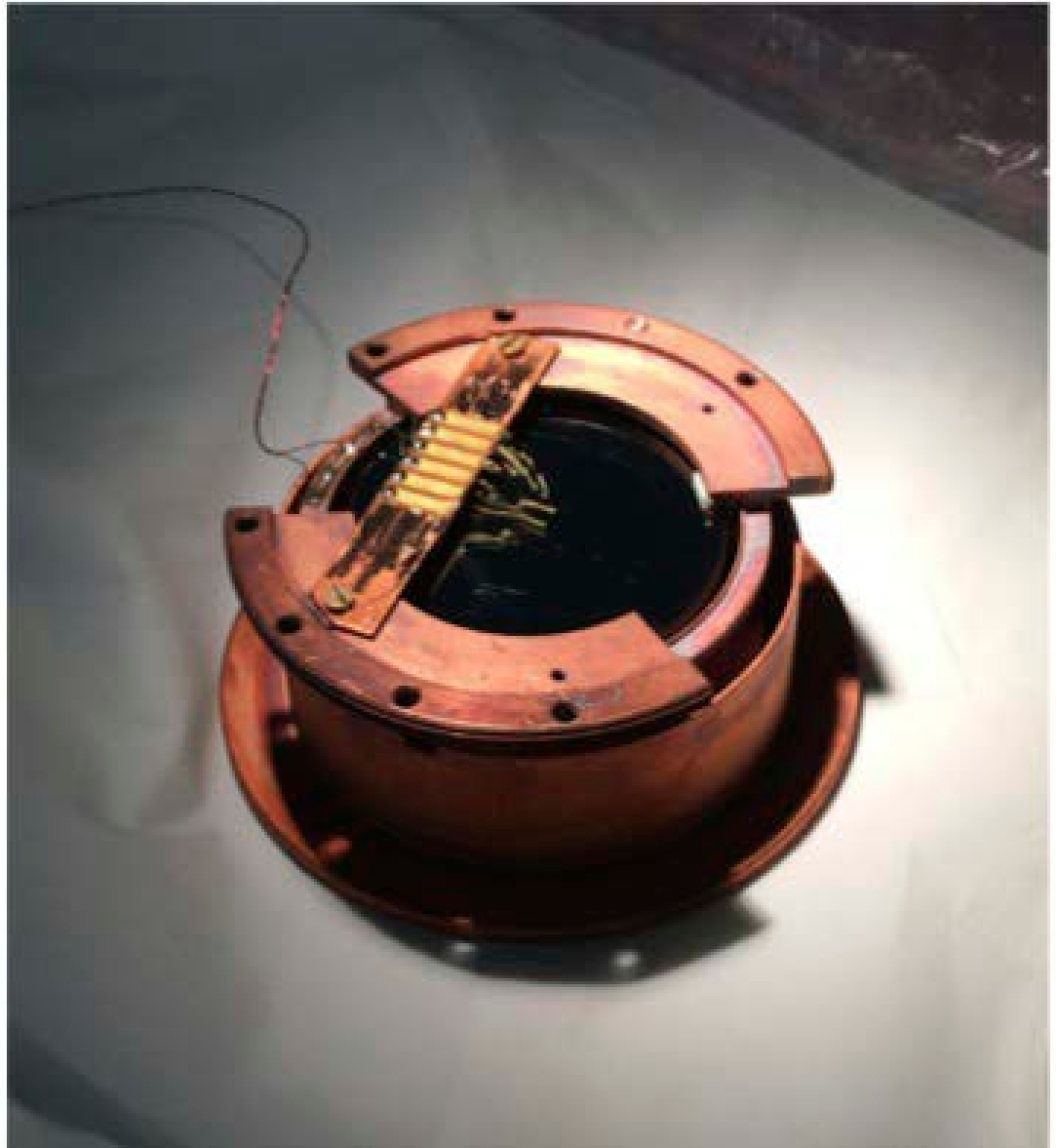






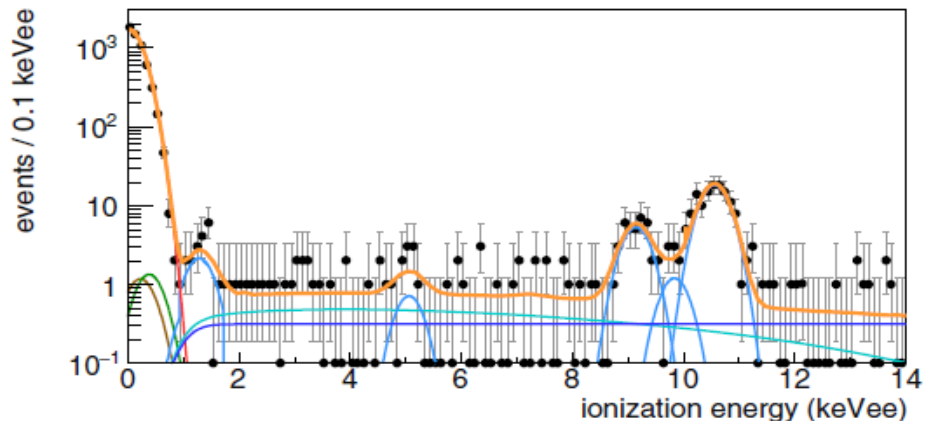
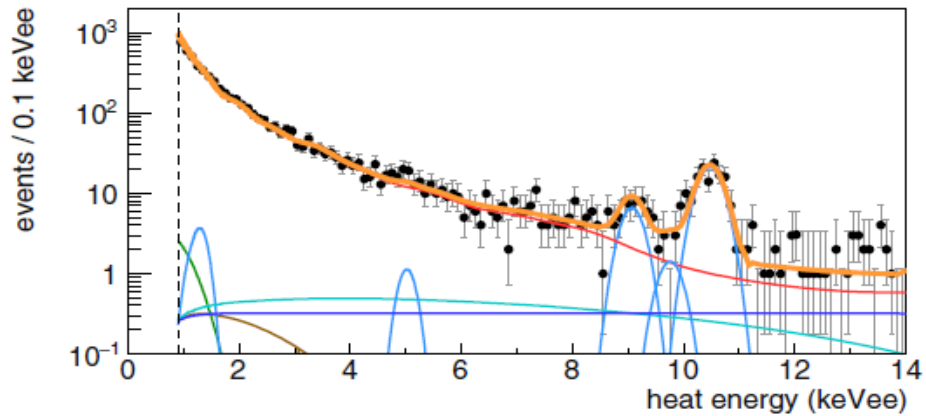
## Дальнейший прогресс: разрешение теплового сенсора

В R&D достигнута  
чувствительность 200  
нВ/кэВ (улучшение в 6  
раз)

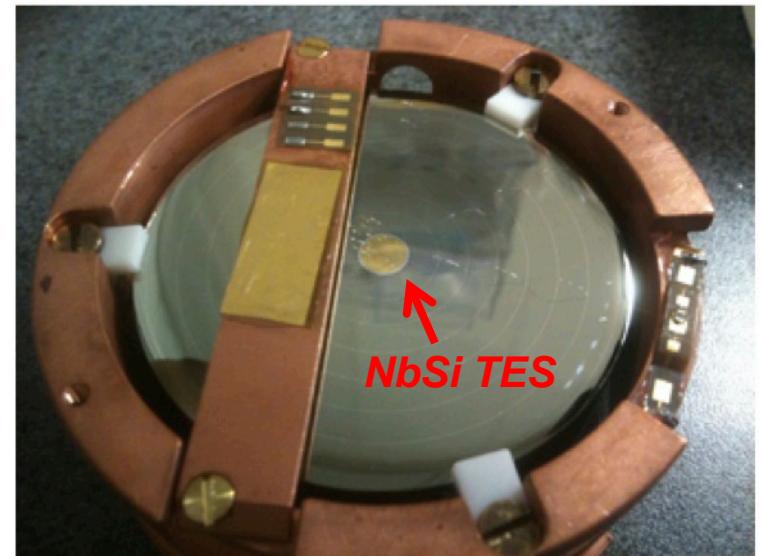
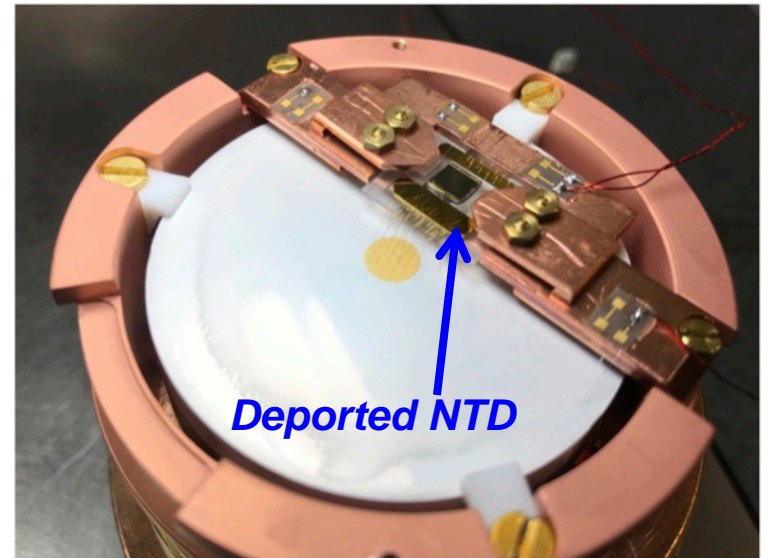


# Дальнейший прогресс: борьба с *heat-only* событиями

Энергетические спектры фоновых (вверху) и ионизационных (внизу) каналов для одного из детекторов EDELWEISS. Результат фитирования модели фона к данным показан оранжевой линией. Компоненты фона: эксклюзивно-фонные (*heat-only*) события - красная линия (доминируют для малых энергий в фоновом канале); Комптон - темно синяя линия; тритиевый бета спектр - бирюзовая линия; космогенные K и L-пики - голубая линия,  $\beta$ -события - зеленая линия; ядра отдачи  $Pb-206$  - коричневая линия.



- Dominant (+reproducible) background at low energy
- Noise, cryogenics, stress from detector suspension: excluded as sources of this background
- Remaining suspect: stress from glueing, avoided via:
  - **Two “deported NTD”, glued on separate sapphire wafer**
  - **Photo-lithographed high- $\Omega$  NbSi TES, sensitive to athermal phonons**

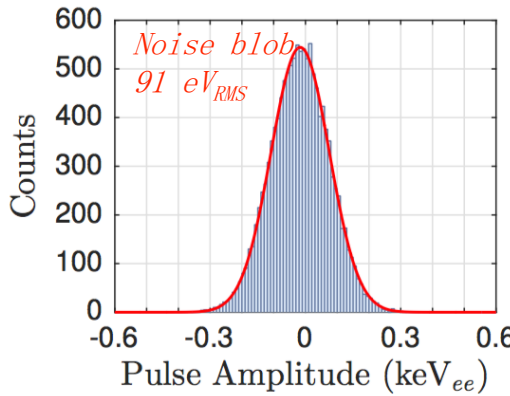
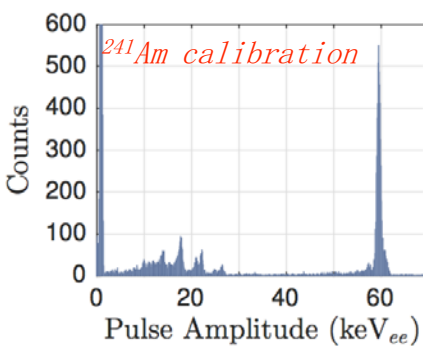




# Дальнейший прогресс: улучшение энергетического разрешения ионизационного канала

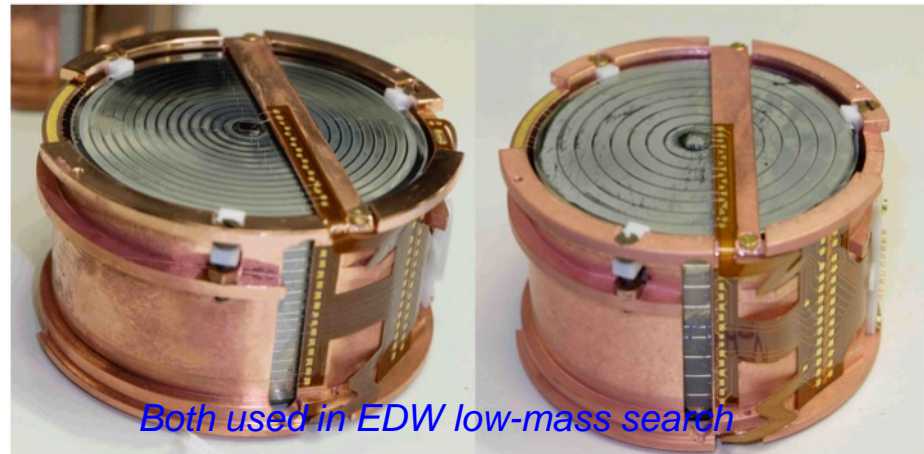
- Замена JFET (полевой транзистор с управляющим PN-переходом) на HEMT (транзистор с высокой подвижностью электронов)
  - Lower intrinsic noise, low heat load
  - Works at 4K: shorter cables reduces capacitance and improves resolution
- **Successful HEMT amplifier with sub-100 eV<sub>RMS</sub> ion. resolution** [A. Phipps, arXiv:1611.09712, collaboration between SuperCDMS and EDW]
- Step#1: Upgrade EDW ionization readout with this new design
- Step#2: Electrode design to reduce detector capacitance to reach 50 eV<sub>RMS</sub>
- Increase of electrode spacing from 2 to 4 mm already successfully implemented

A. Phipps et al, arXiv: 1611.09712



**FID842**  
2 mm spacing

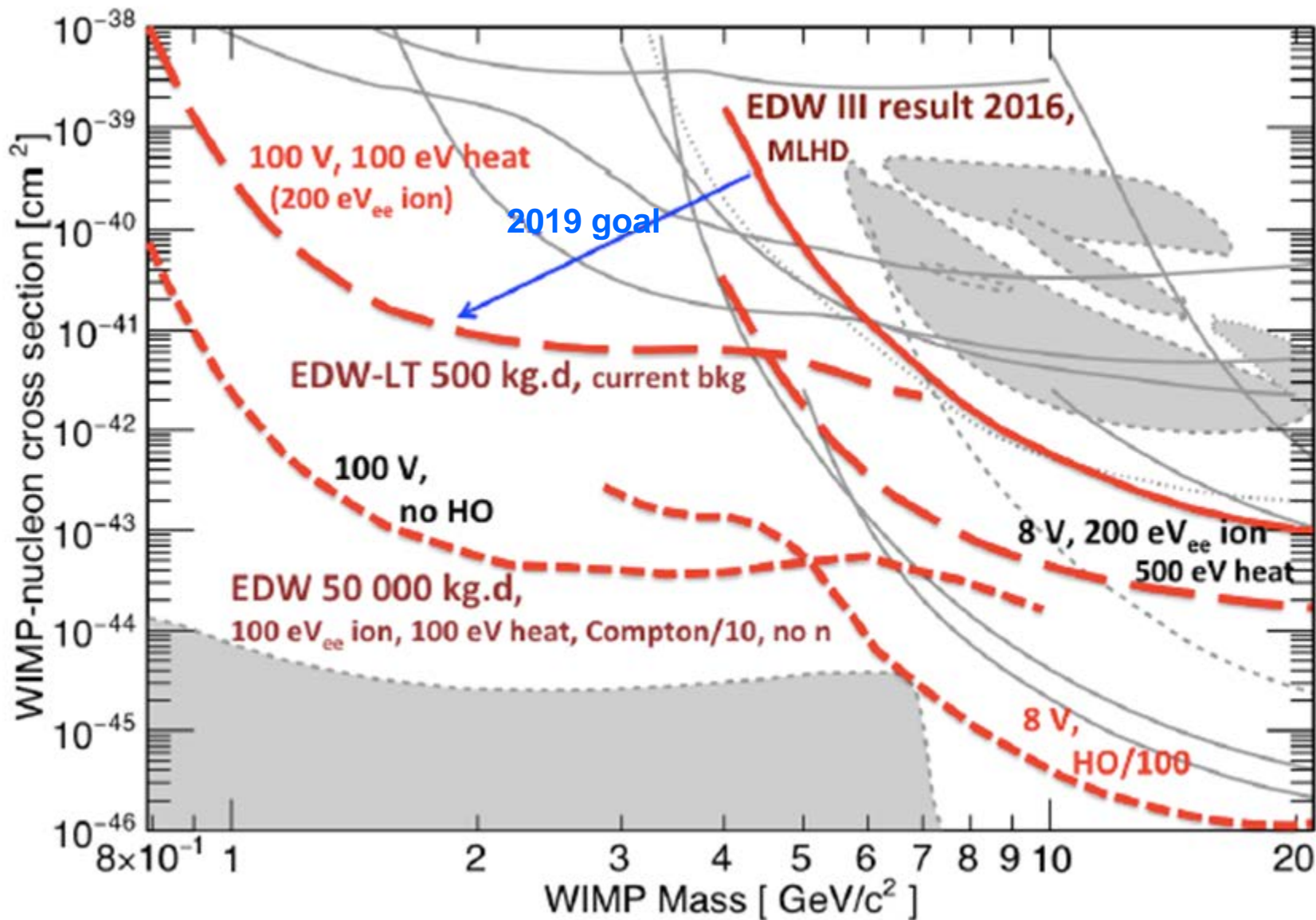
**FID824**  
4 mm spacing



Both used in EDW low-mass search



# Ожидаемые результаты



<b>Time</b>	<b>Task</b>
2017-2018	Search for source of heat only events (Building and testing of HPGe crystals with different thermistors, holders, crystal treatments, delivery of the detectors to LSM, measurements)
2018-2019	Delivery (production) of EDELWEISS-LT detectors
2019	Delivery of the upgrades (cryogenics, wiring, electronics, internal shield)
2019	500 kgd EDELWEISS-LT result
2019	Decision about ultimate EDELWEISS-LT detectors design
2019-2020	Accumulation of WIMP data, improving of background, preparation to 50000 kgd phase (production of detector, tests, calibrations).
2020-2021	Upgrade of EDELWEISS shield, cryogenic, start of 50000 kgd phase of EDELWEISS-LT

# Обязанности в EDELWEISS

Общие обязанности:

Сборка установки

Запуск

Набор данных

Проведение калибровочных измерений

МС

Анализ данных

Наша ответственность:

Контроль радона

Измерения нейтронов

Измерения радиоактивности материалов

Эксплуатация чистой комнаты

Сертификация радиоактивных материалов

Новые детекторы (детекторы с низким энергетическим порогом)

Мы участвуем:

Измерения нейтронов в совпадениях с мюонным вето

База данных

# Участие ОИЯИ

Маленькая коллаборация, приходится участвовать практически на всех этапах проведения эксперимента



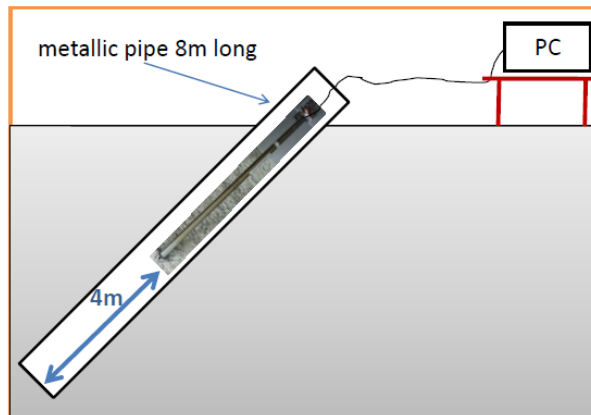
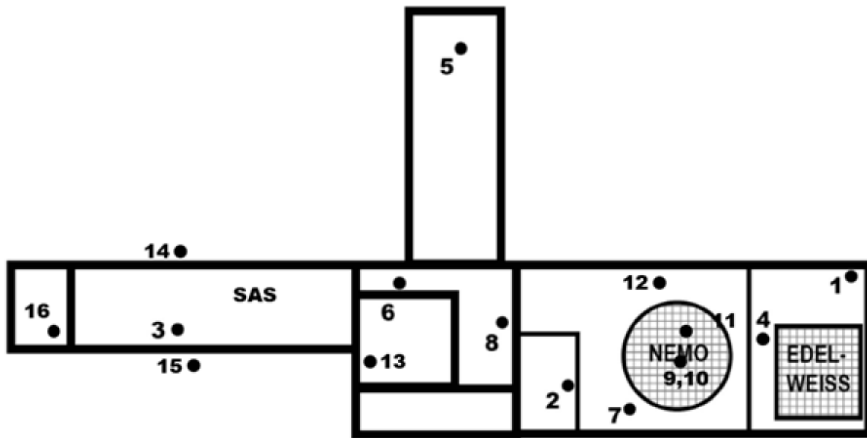




**Наше оборудование в EDELWEISS**



# $^3\text{He}$ детектор, поле нейтронов в LSM

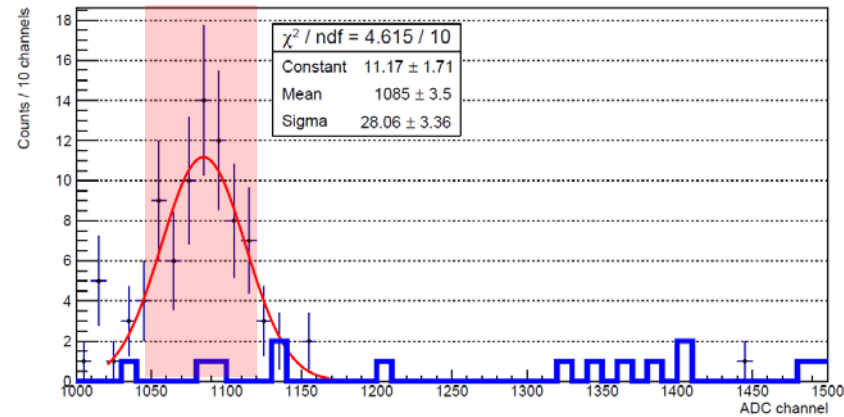
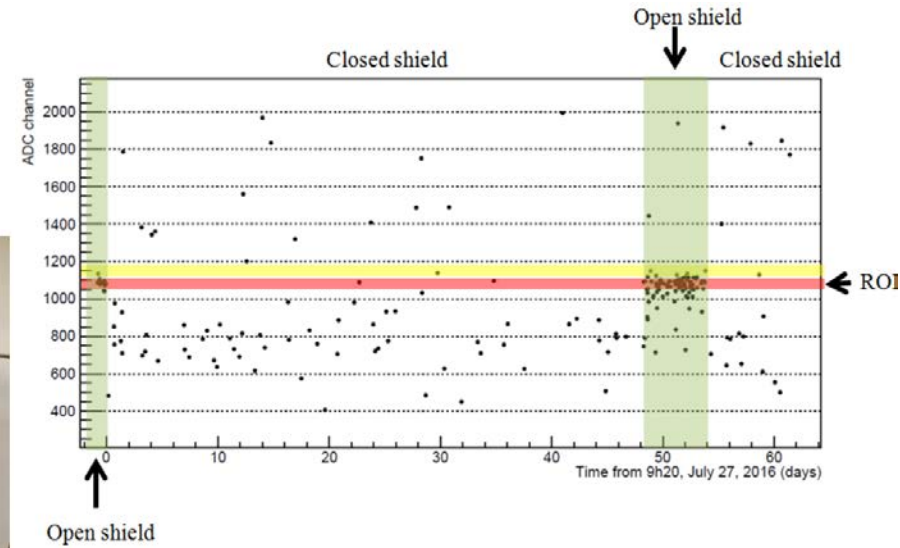


Thermal neutron flux		
Point	Counting rate at ROI, cpd	Thermal neutron flux, $10^{-6}$ n/cm <sup>2</sup> /sec
1	$76.8 \pm 1.5$	$3.64 \pm 0.07$
	$78.2 \pm 2.3$	$3.72 \pm 0.11$
	$74.35 \pm 0.6$	$3.54 \pm 0.03$
2	$97.7 \pm 9.3$	$4.7 \pm 0.5$
	$106.1 \pm 7.3$	$5.1 \pm 0.4$
3	$130.7 \pm 12.2$	$6.3 \pm 0.6$
	$140.3 \pm 7.4$	$6.7 \pm 0.4$
	$148.2 \pm 12.3$	$7.1 \pm 0.6$
4	$43.3 \pm 4.0$	$2.1 \pm 0.2$
	$59.7 \pm 4.5$	$2.9 \pm 0.2$
5	$94.7 \pm 9.7$	$4.5 \pm 0.5$
	$112.1 \pm 7.5$	$5.3 \pm 0.4$
6	$43.3 \pm 4.0$	$2.1 \pm 0.2$
	$59.7 \pm 4.5$	$2.9 \pm 0.2$
7	$43.3 \pm 4.0$	$2.1 \pm 0.2$
	$59.7 \pm 4.5$	$2.9 \pm 0.2$
8	$43.3 \pm 4.0$	$2.1 \pm 0.2$
	$59.7 \pm 4.5$	$2.9 \pm 0.2$
9	$93.3 \pm 5.1$	$4.4 \pm 0.3$
10	$86.1 \pm 5.4$	$4.1 \pm 0.3$
11	$76.13 \pm 5.0$	$3.63 \pm 0.24$
12	$207.09 \pm 7.1$	$9.86 \pm 0.34$
	$200.81 \pm 1.6$	$9.56 \pm 0.08$
13	$179.1 \pm 1.0$	$8.53 \pm 0.05$
14	$162.2 \pm 9.3$	$7.72 \pm 0.45$
15	$172.5 \pm 4.2$	$8.22 \pm 0.20$
16	$130.2 \pm 7.8$	$6.20 \pm 0.38$

# $^3\text{He}$ детектор, установленный сверху криостата EDELWEISS

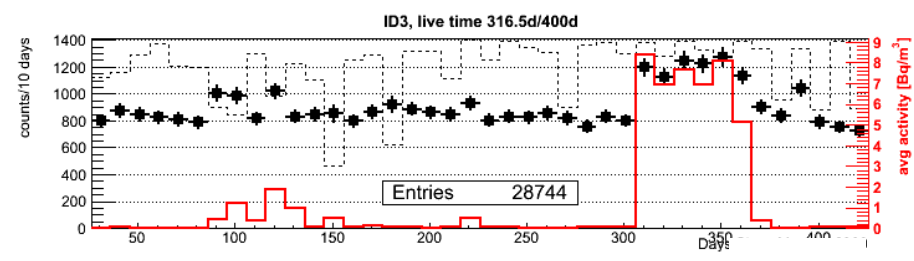
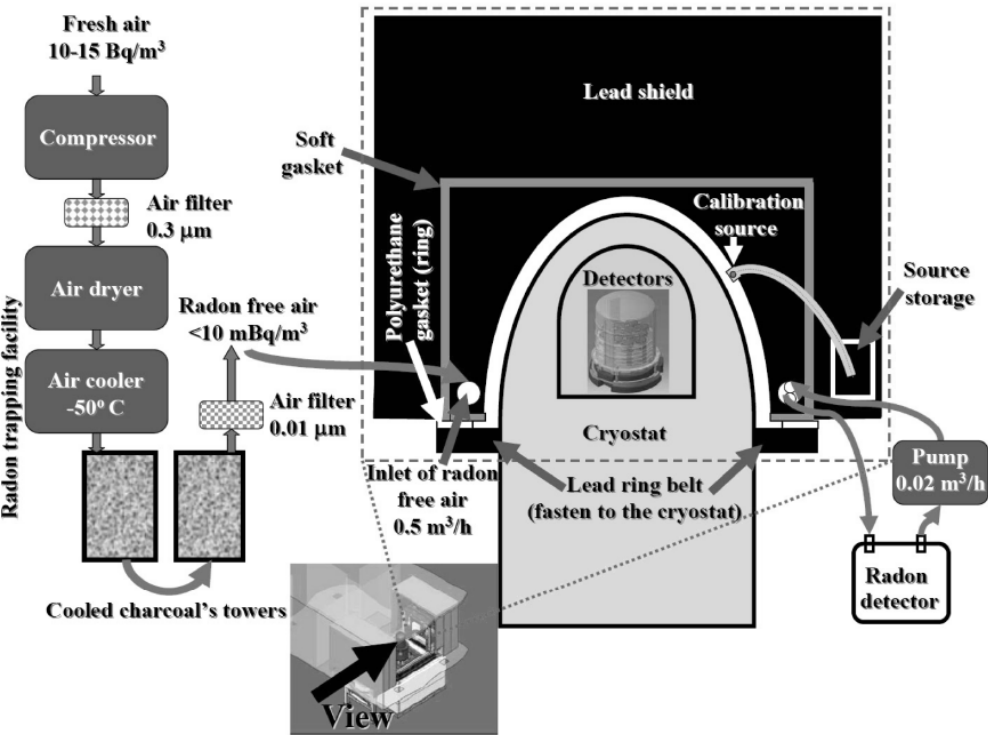
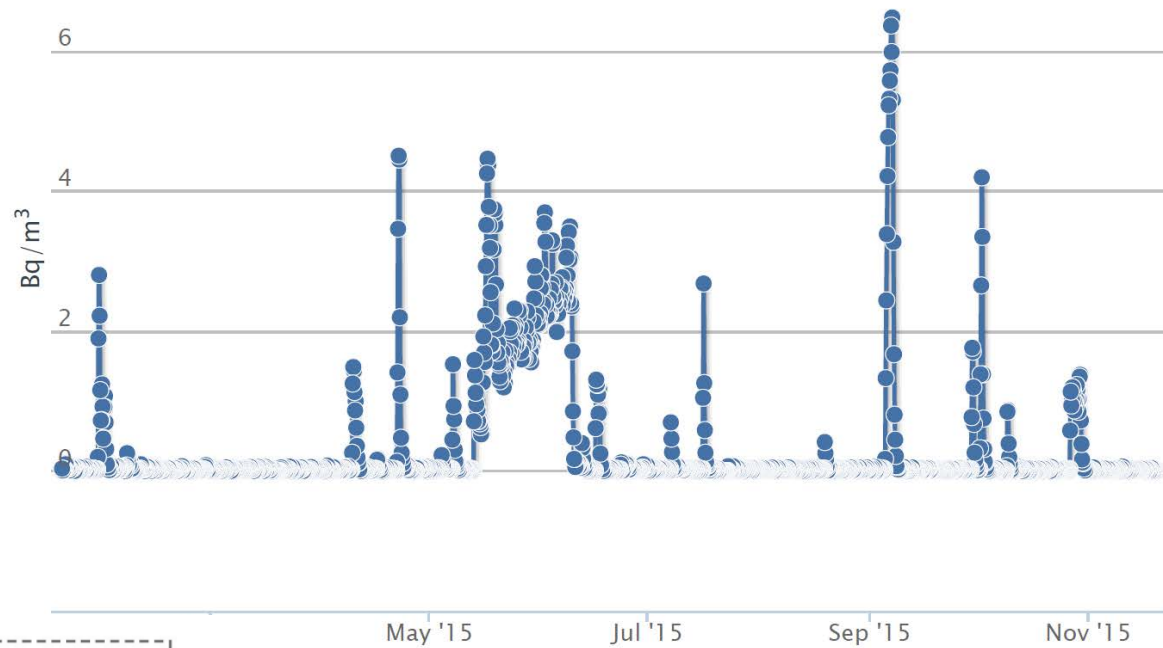


$< 10^{-8}$  нейтрон/см<sup>2</sup>/сек





Уровень радона вблизи криостата EDELWEISS в течении 2015 года. Периоды высокого уровня соответствуют открытой защите, проблемам с анти-радоновой фабрикой, и др.



# Набор данных

localhost7113

Panel\_EDWA3

Graph Tools Values Config One flag<0 Record Quit

Sources

Arg\_in Arg\_out

Ba\_grotte Ba\_nemo Co\_France Co\_Italie

2 : automatique

Bouilleur 15 : 10 mW

Températures

T\_100K 97.72 K  
T\_50K 57.37 K  
T\_B1K 1.40 K  
T\_Speer 11.20m K  
T\_Bolo 19.00m K  
P\_regul 2.95u W

Alimentations BB

Alim1 Seuil\_1 12  
Alim2 Seuil\_2 12  
Alim3 Seuil\_3 12  
Alim4 Seuil\_4 12

Suspension du cryostat

A1p A1m 3.809 Hc1 5.782  
A2p A2m 3.524 Hc2 5.609  
A3p A3m 3.827 Hc3 5.716  
A4p A4m 3.861 Hc4 5.808  
Pair 5.397 S\_bas 5 S\_haut 6

Press, Temp, Hum

Temp\_SB 19.57  
Hum\_SB 10.55  
Press\_SB 29.30m  
P\_GM1 1.00  
P\_Arg 987.01  
P\_eau\_comp 1.85

Niveau He

He1 3.849  
He2 3.857  
He3 3.847  
He4 3.656  
He5 0.011  
He6 3.614  
He7 3.630  
He8 3.596  
He9 3.547  
He10 3.541  
He11 3.477

cryostat

P\_vaseHe 831 mb  
P\_B1K 11.89 mb  
P\_injection 219 mb  
P\_reserve 8 mb  
debit 368 μmol/s

GM1 Power Pt2\_GM2\_GM3 Power

Turcalo K3,K5 : NON CONNECTES

Vitesse circulateur (Consigne en %)

circu 50

Pression circulateur (bar)

Ccircu 2.0  
Pcircu 2.063  
Tcircu 26  
Vcircu 332

Bolometres

50K Pt\_2 K8 K7 K2 K1

GM1 GM2\_50K GM3\_100K Circulateur Pompage Vide Machines EDWA1

Vc3 C.cir.in Remplis.  
Vc4 C.cir.out Recupér.  
Vc3 Pompe

Tcd2 40.25 Tcd1 64.70 Tcd3 111.78 Tcd4 90.26

FR

05:39 mardi

Boost.LAN Manager 120000

51	IPNL/Dubna	IPNL	Dubna	Dubna	Dubna	Dubna	Dubna	Dubna
52	Dubna	Dubna	Dubna	Dubna	Dubna	Dubna	IPNL	IPNL
01	IPNL/Dubna ?							

Page : 159 sur 160 Mots : 66 329 Anglais (États Unis) 104 %

tion

pour en faire attendre d'arriver anche. (tour) puis canne

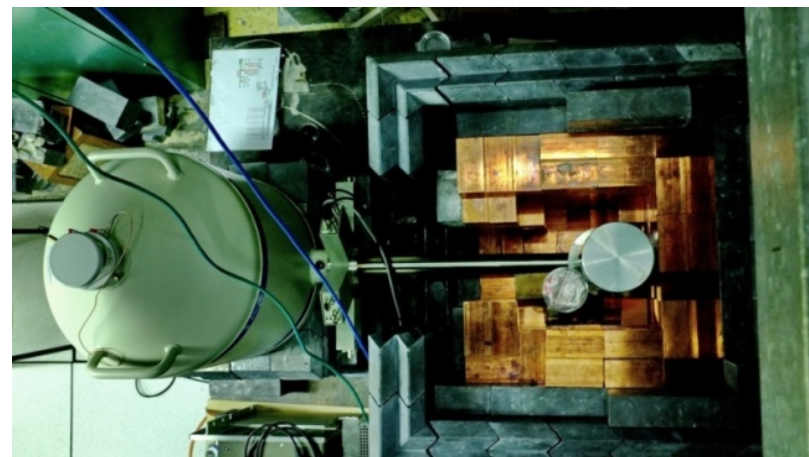
e. Bien changer

fermer vanne ¼ asfert fini

respiration sinon

or changed

## EDELWEISS-I для R&D



**Участие в EDELWEISS обеспечивает доступ к инфраструктуре в подземной лаборатории LSM, необходимой для экспериментов на КАЭС**

## **В заключение:**

- **Прямой поиск темной материи является критически важным для установления факта присутствия WIMP; основная проблема - необходим чрезвычайно низкий фон;**
- **SUSY может быть открыта на БАК в ближайшее время;**
- **Для изучения свойств темной материи необходимо разнообразие ядер мишеней (Ar, Xe, Ge, . . .);**
- **EDELWEISS имеет лидирующие позиции при поиске легких WIMP, следующая фаза EDELWEISS-LT**

## Публикации

- Q Arnaud, et al (EDELWEISS collaboration) Optimizing EDELWEISS detectors for low-mass WIMP searches, 2017, arXiv preprint arXiv:1707.04308, submitted to Phys. Rev. D
- E Armengaud, et al (EDELWEISS collaboration), Measurement of the cosmogenic activation of germanium detectors in EDELWEISS-III, *Astroparticle Physics*, 91, 2017, 51-64
- E Armengaud, et al (EDELWEISS collaboration) Performance of the EDELWEISS-III experiment for direct dark matter searches, *Journal of Instrumentation*, 12, 08, P08010, 2017, arXiv preprint arXiv:1706.01070
- L Hehn, et al (EDELWEISS collaboration) Improved EDELWEISS-III sensitivity for low-mass WIMPs using a profile likelihood approach, 2016, *The European Physical Journal C* 76 (10), 548
- E Armengaud, et al (EDELWEISS collaboration) Constraints on low-mass WIMPs from the EDELWEISS-III dark matter search, 2016, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2016 (05), 019
- AV Rakhimov, et al, Neutron activation analysis of polyethylene from neutron shield of EDELWEISS experiment, *Radiochimica Acta* 103 (9), 673-678, 2015
- G Angloher et al, EURECA conceptual design report, *Physics of the Dark Universe*, 3, 41-74, 2014
- B Schmidt et al. Muon-induced background in the EDELWEISS dark matter search. 2013, *Astroparticle Physics* 44, 28-39.
- E. Armengaud et al. (EDELWEISS collaboration) Axion searches with the EDELWEISS-II experiment. In: *JCAP* 1311 (2013), p. 067. arXiv: 1307.1488 [astro-ph.CO];
- E Armengaud, et al (EDELWEISS collaboration) Background studies for the EDELWEISS dark matter experiment, *Astroparticle Physics* 47, 1-9, 2012
- E Armengaud, et al (EDELWEISS collaboration) Search for low-mass WIMPs with EDELWEISS-II heat-and-ionization detectors, *Physical Review D* 86 (5), 051701, 2012

During participation of JINR in the EDELWEISS program the most cited (more than 300 times) article is: E Armengaud et al. "Final results of the EDELWEISS-II WIMP search using a 4-kg array of cryogenic germanium detectors with interleaved electrodes". *Phys.Lett. B*702 (2011), pp. 329-335. arXiv: 1103.4070 [astro-ph.CO]

*О чем еще можно было бы поговорить:*

*Связь прямого и косвенного поиска, ...*

*Спин-зависимое взаимодействие, ...*

*Неупругое рассеяние, ...*

*Аксионы, ...*

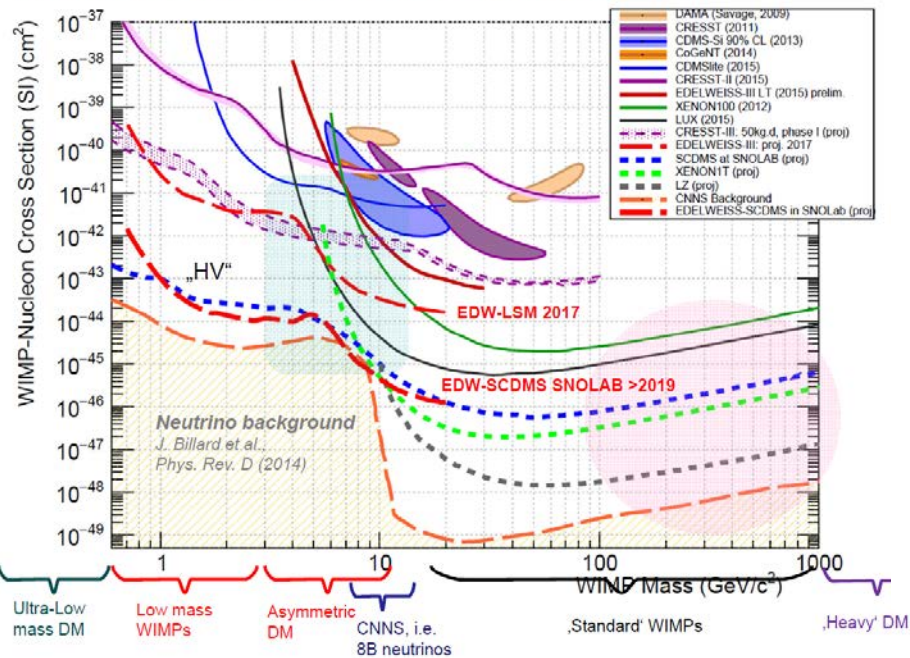
*...*



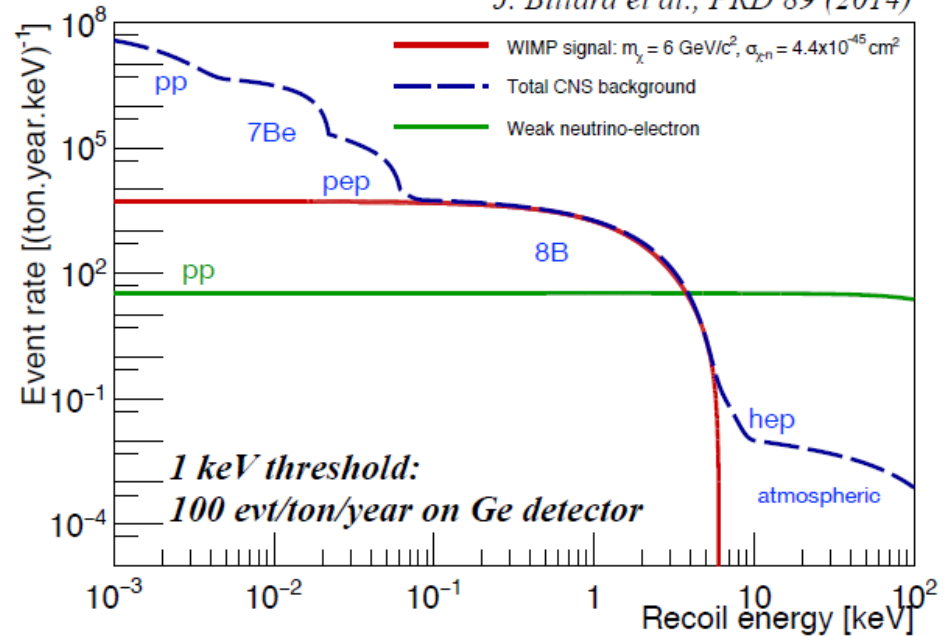


- Когерентное рассеяние является неустранимым фоном для экспериментов по поиску темной материи.

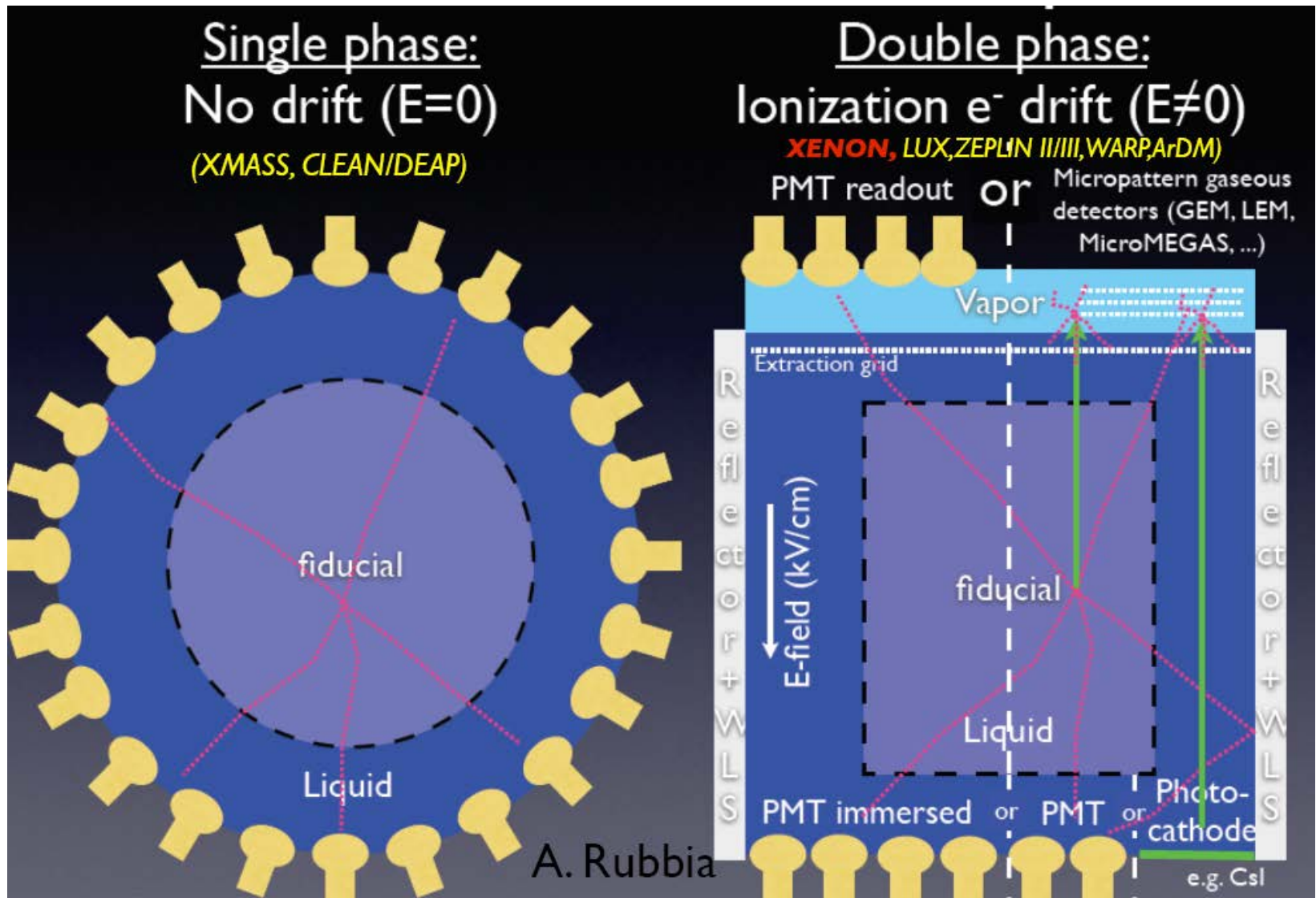
### What is Dark Matter & where to look for?



J. Billard et al., PRD 89 (2014)



# Noble liquid detectors



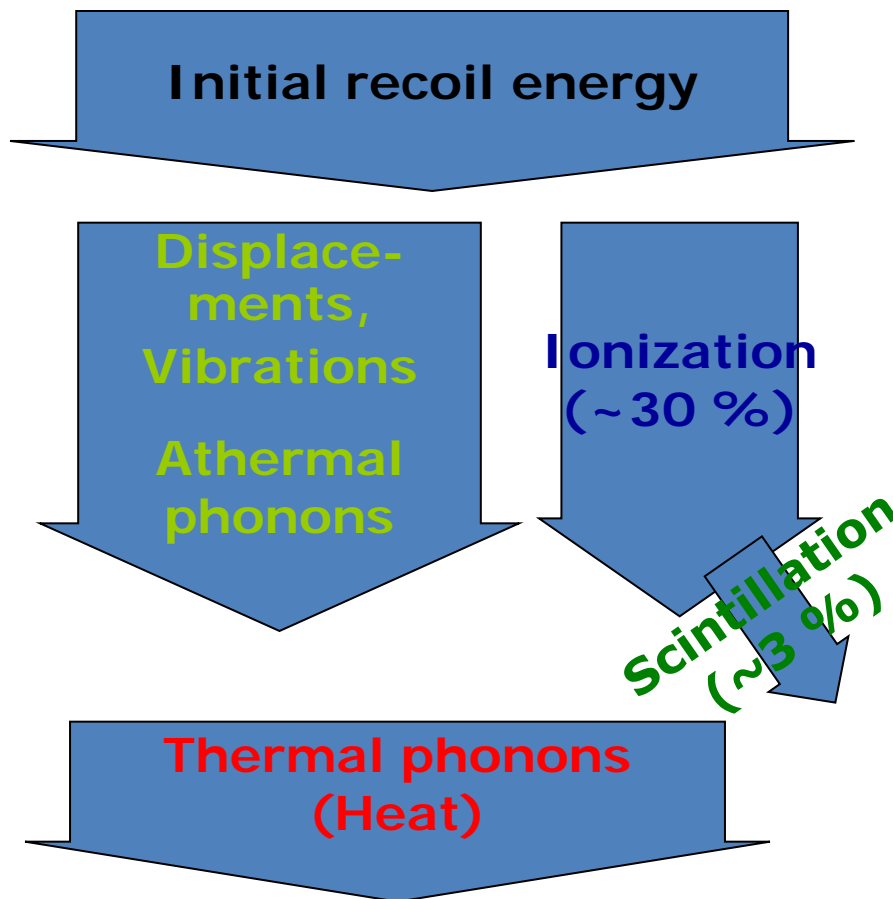
## LUX experiment

- Two-phase liquid xenon
- Homestake/Sanford (USA)
- 122 2" PMTs (R8778)
- 350kg total, 118 kg fiducial



# Cryogenic Techniques

Combination of phonon measurement with measurement of ionization or scintillation

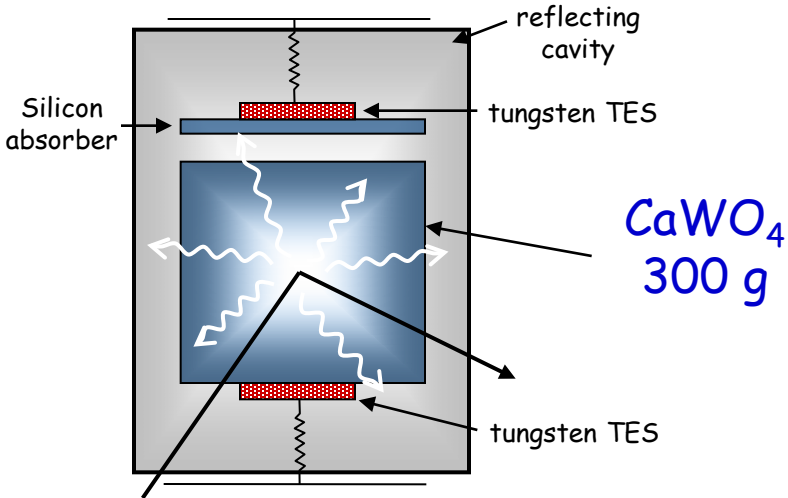


**Phonon:** most precise total energy measurement

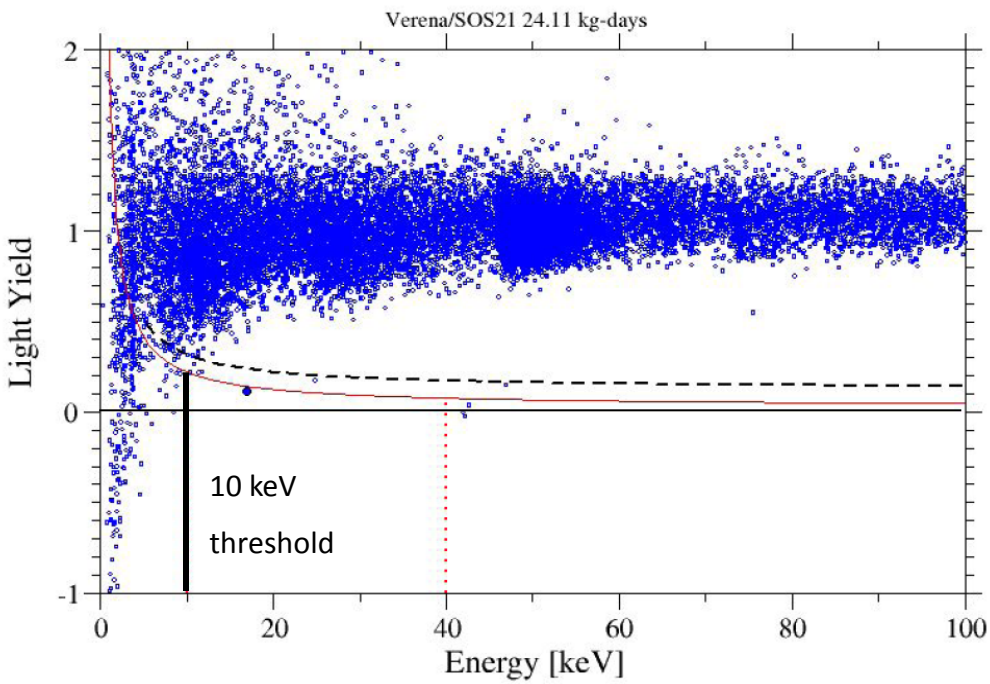
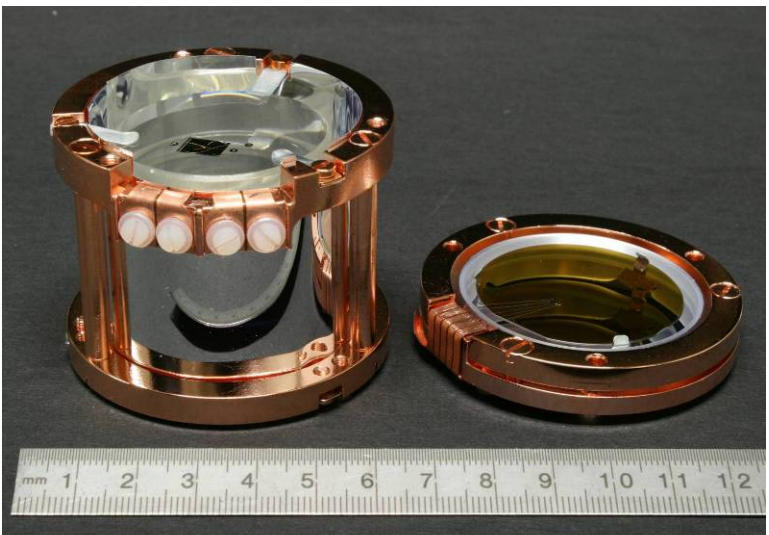
**Ionization / Scintillation:** yield depends on recoiling particle

Nuclear / electron recoil discrimination.

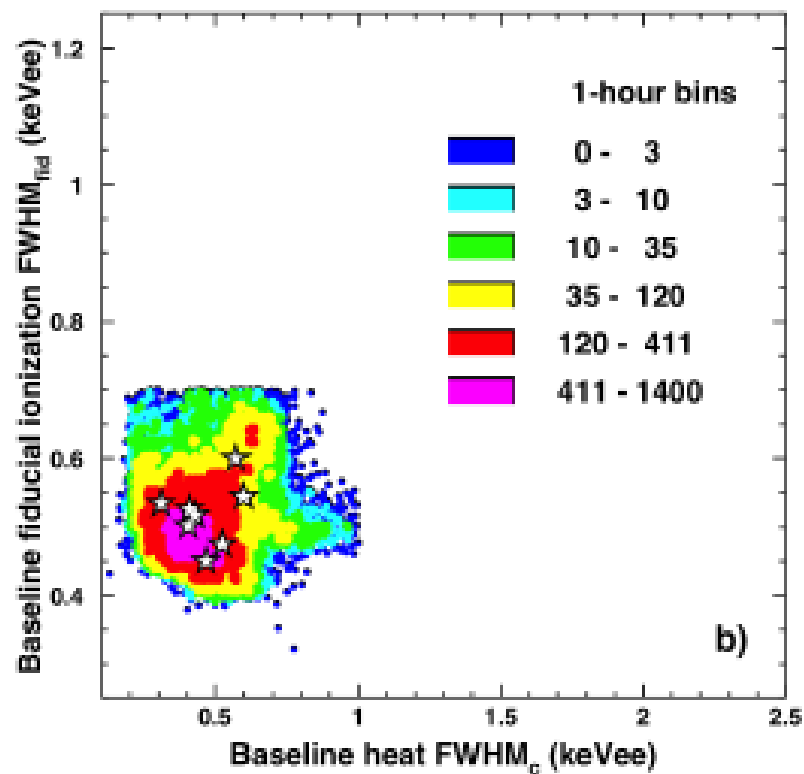
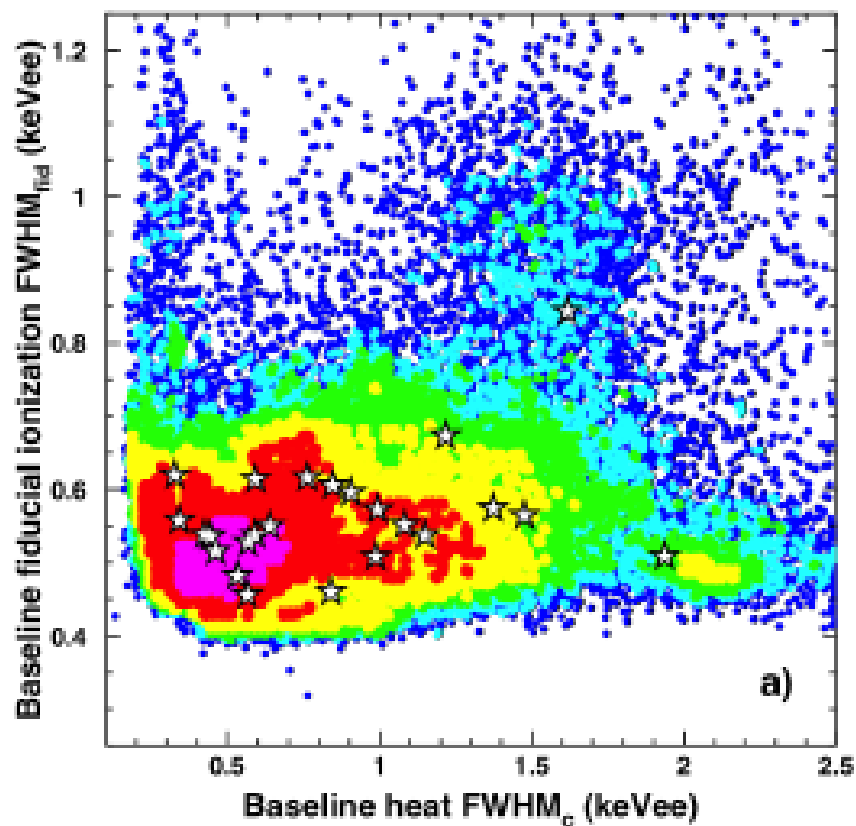
# CRESST



Heat — Light  
↓ — ↓  
Energy — Identification







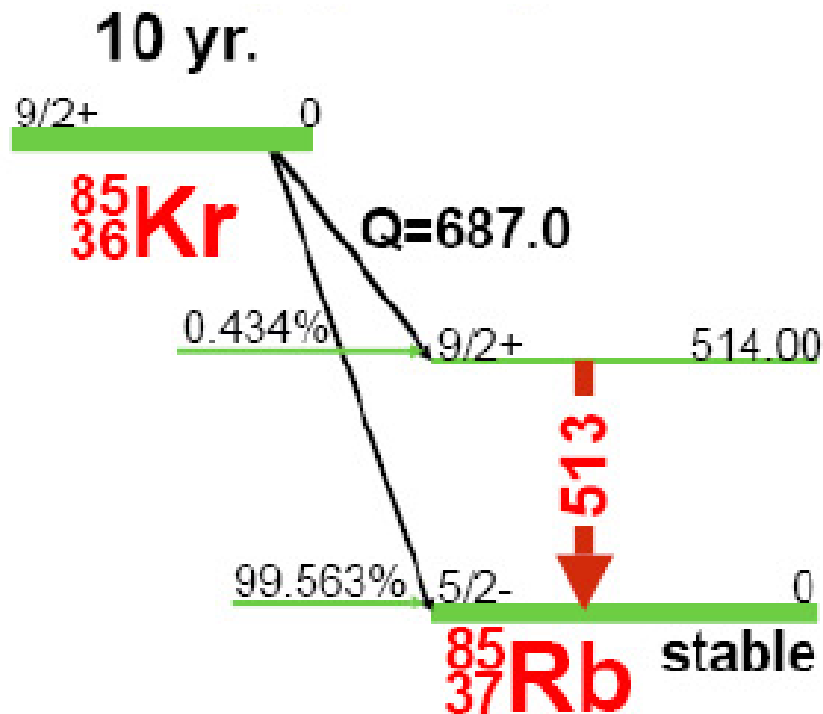
# Криптон

Выход при делении Kr-85

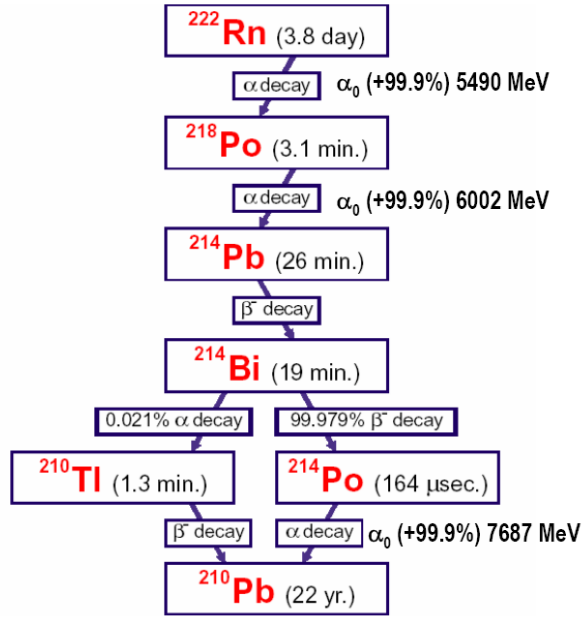
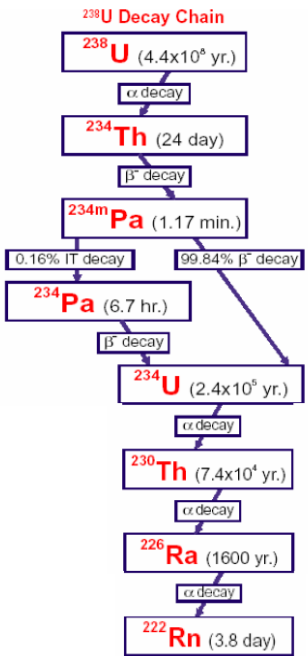
Выход (%)

Изотоп тепловые и быстрые n

Изотоп	тепловые n	быстрые n
$^{232}\text{Th}$	2.28	4.14
$^{233}\text{U}$	1.32	2.12
$^{235}\text{U}$	1.33	1.33
$^{238}\text{U}$	0.74	0.74
$^{239}\text{Pu}$	0.62	0.62



# Почему радон представляет проблему?

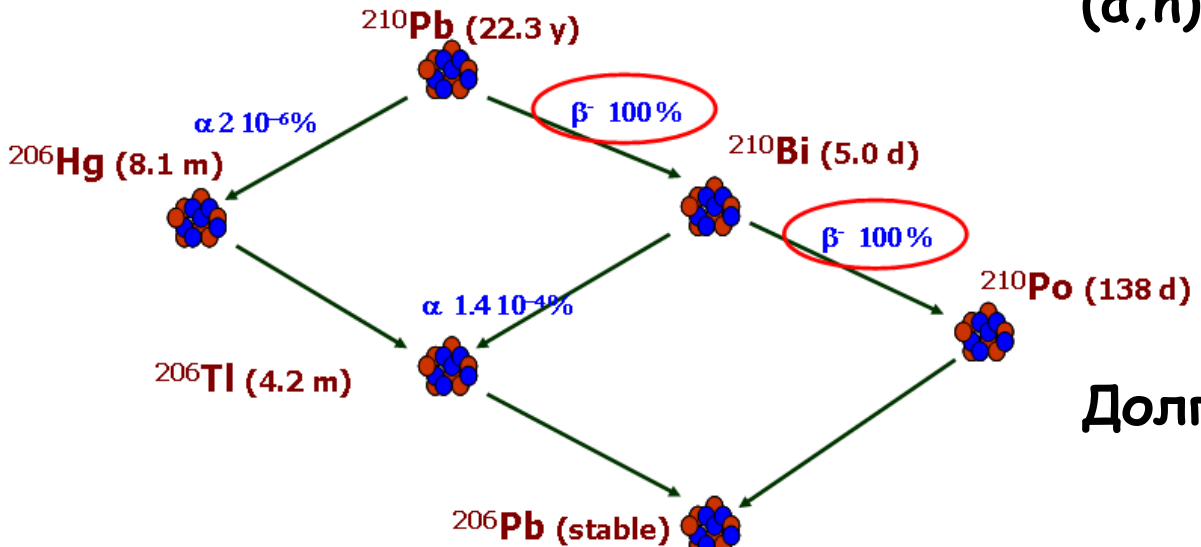


Сразу после распада

Основные γ: <sup>214</sup>Bi

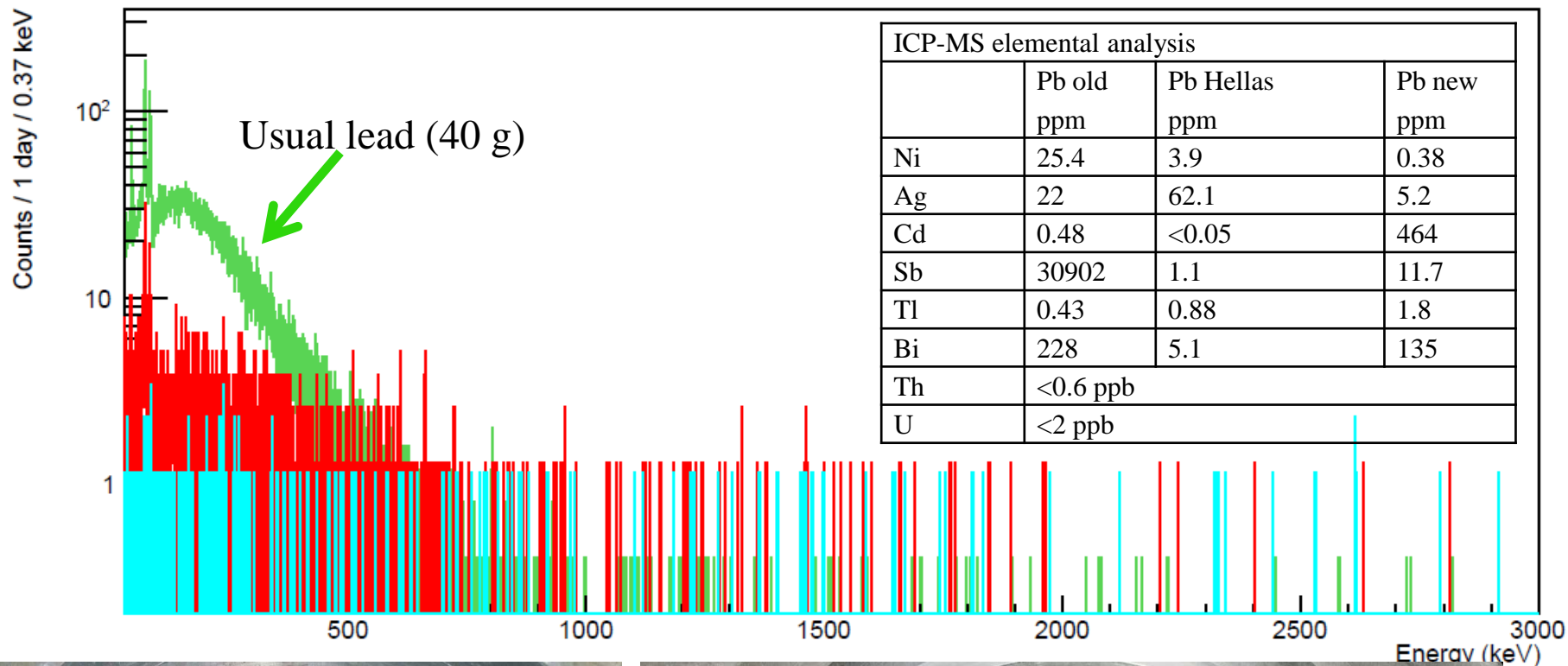
Важно: дочерние продукты радона имеют тенденцию к накоплению на поверхностях

(α, n) реакции



Долговременные проблемы

# Measurements of Pb samples with the OBELIX (600 cm<sup>3</sup> HPGe) spectrometer (LSM)



# Roman lead



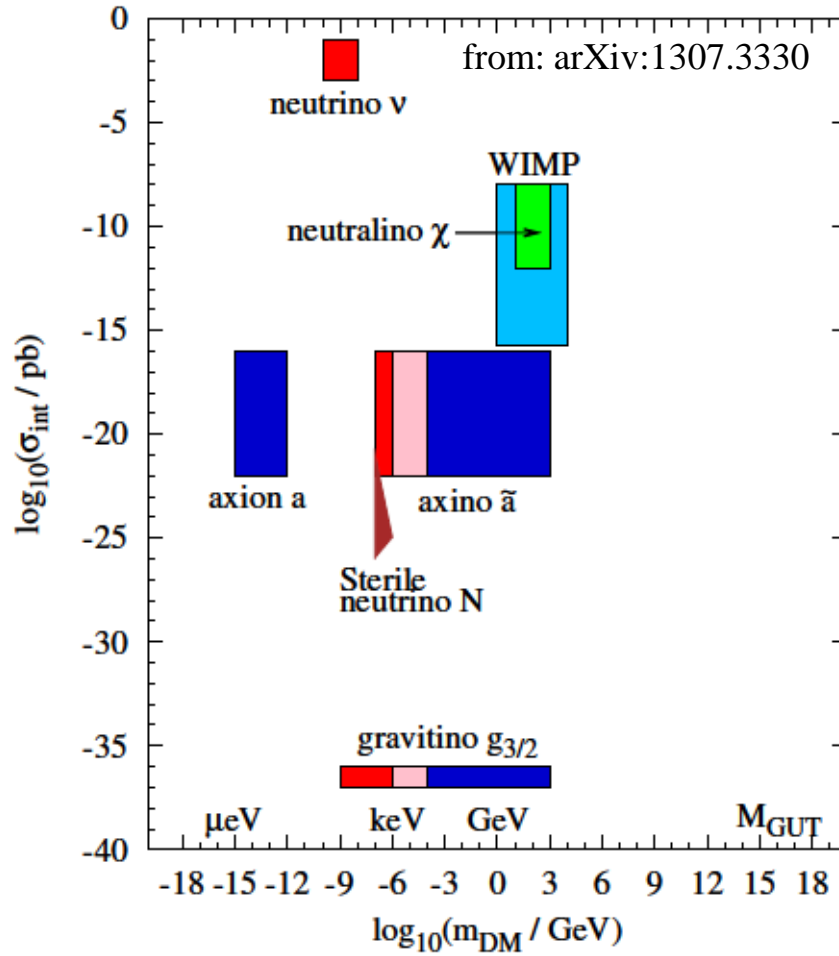
We drill a hole in the ingot and collected samples from different depth

ICP-MS elemental analysis						
	Pb Hellas ppm	Pb ingot 0-1.5 cm ppm	Pb ingot 1.5-3.7 cm ppm	Pb ingot 3.7-5.4 cm ppm	Pb ingot 5.4-7.15 cm ppm	Pb ingot 7.15-9.15 cm ppm
Ni	3.9	10.2	10.6	12.5	9.5	18.6
Ag	62.1	80.7	90.7	98.2	69	158
Cd	<0.05	<0.1				
Sb	1.1	79.2	71.6	83	56.5	104
Tl	0.88	<0.7				
Bi	5.1	<4				
Th	Limit (<0.6 ppb Hellas, <0.2 ingot)					
U	Limit (<2 ppb Hellas, <5 ppb ingot)					

Archeological Pb ingot are clean, attention to contamination during a treatment!



# Что ищем?



Частицы, возникшие вскоре после Большого взрыва.

Одна частица, или несколько?

SUSY? (пока нет никаких доказательств)

$$\frac{Rate}{Mass} \approx \rho_{wimp} \times f(Velocity) \times \frac{A}{M_{wimp}} \sigma_{wimp-nucleon} \times F(Coherence)$$

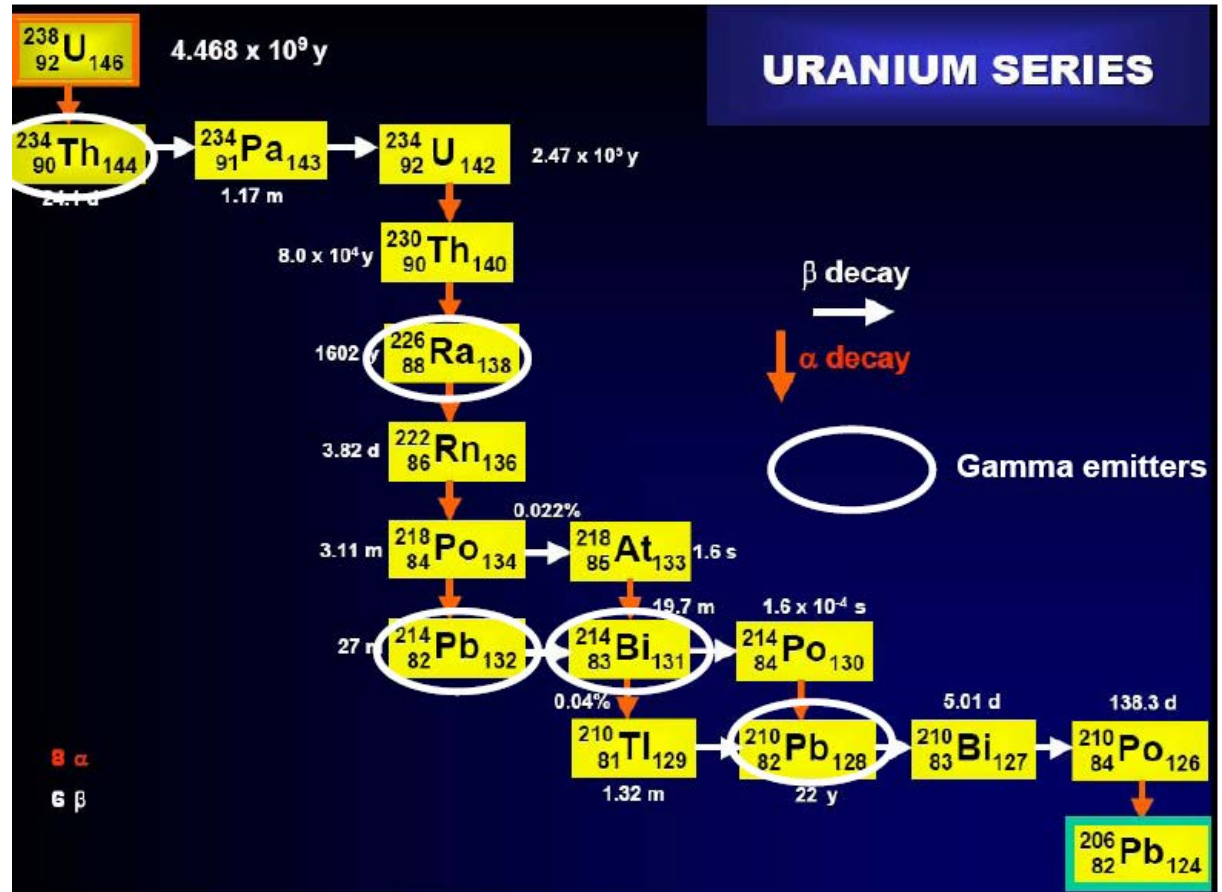
## Астрофизика:

- Lewin&Smith [Astrop 6 (1996) 87] соглашение для сравнения экспериментов
- $\rho_{wimp} = 0.3 \text{ ГэВ}/c^2/\text{см}^3$ 
  - ... несмотря на более новые данные:  $0.39 \pm 0.02$  [Ullio+Catena 0907.0018]
- Сферическое изотермическое гало:  $v_{WIMP} \sim v_{SUN} \sim 230 \text{ км/сек}$ 
  - ... несмотря на то, что более комплексные модели гало существуют и вполне могут более точно отображать реальность

## Физика частиц и ядерная физика:

- Свободные параметры / предсказания теории:  $M_{WIMP}, \sigma_{WIMP-nucleon}$ 
  - Экстраполяция WIMP-кварк -> WIMP-нуклон:
- Другие факторы (Coherence):
  - $\sim A^2$  для скалярного взаимодействия (спин-независимое, доминирует для  $A > \sim 20$ )
  - $\sim 1/(1+1)$  для векторного взаимодействия (спин-зависимое)

**$^{222}\text{Rn}$**

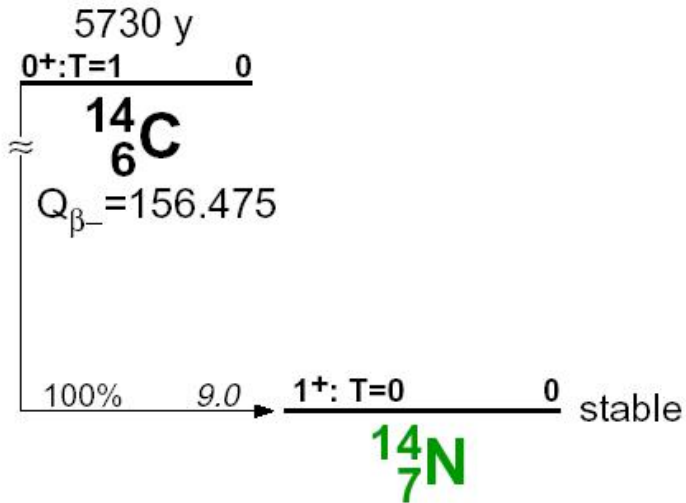


Уран в природе:

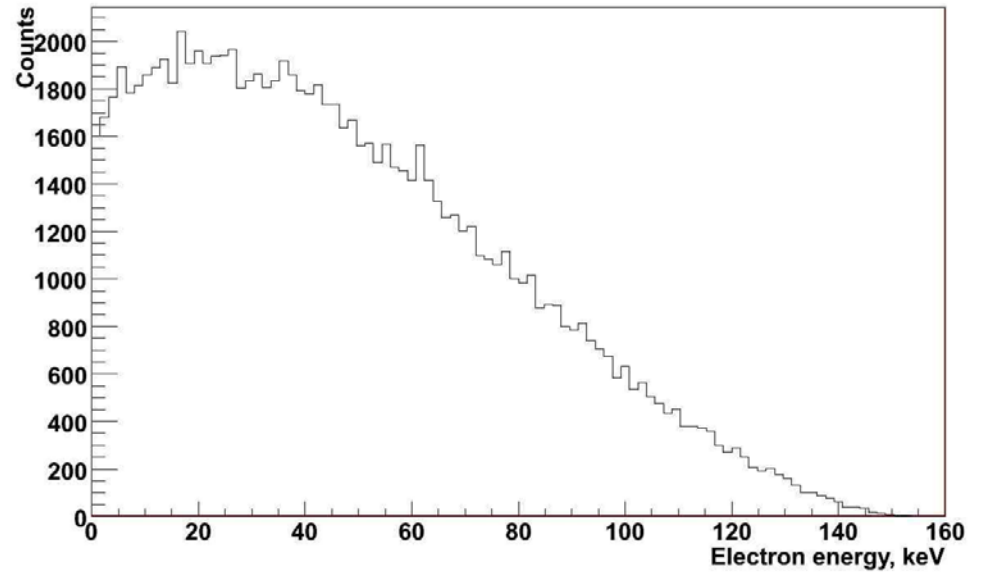
Горная порода	$10^{-6}$ г/г
Стекло	$10^{-6}$ г/г
Нержавеяка	$10^{-9}$ г/г
Тефлон	$10^{-10}$ г/г

$^{238}\text{U}$  скорость распада = 12400 Бк/г

Для примера, в горной породе активность  $^{238}\text{U} \sim 10$  Бк/кг

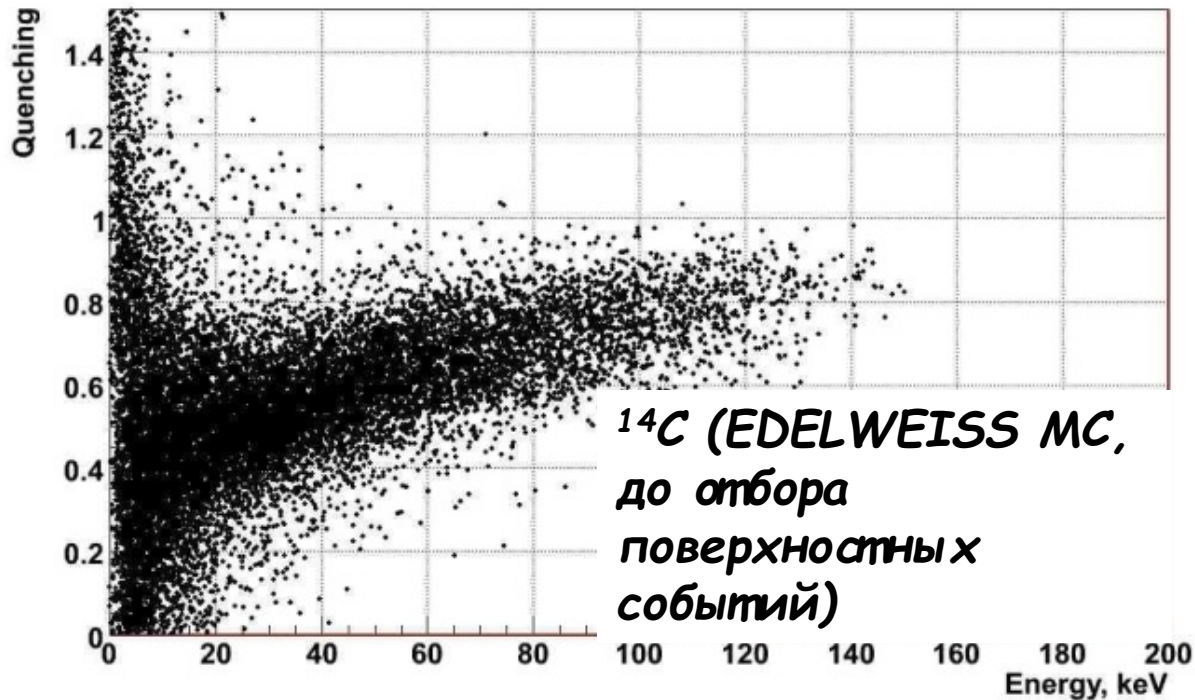


Beta spectrum of C14



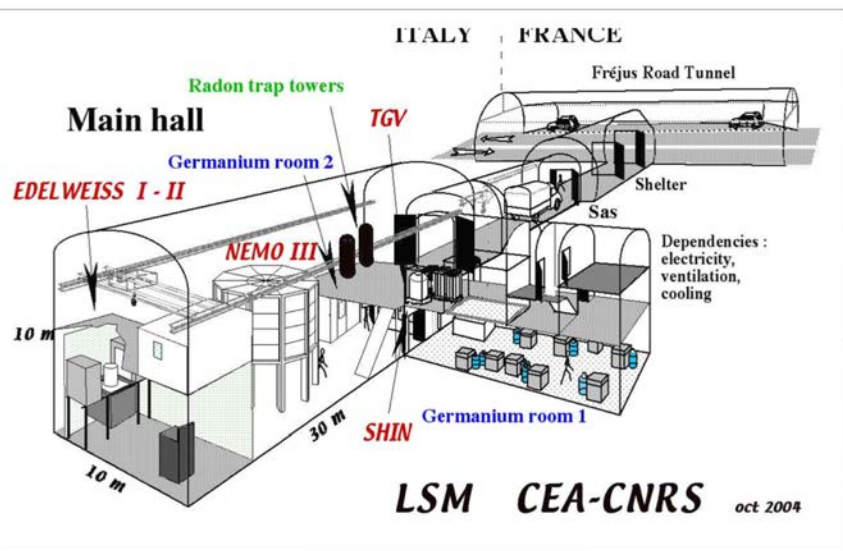
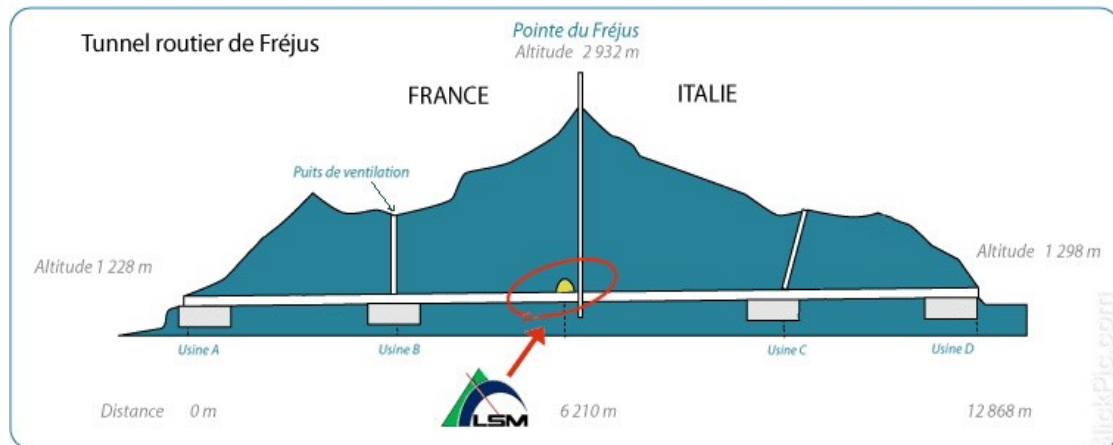
Simulated spectrum of  $^{14}\text{C}$  on the surface of 3 Ge detector, 20000 kg\*d

Entries 18301



## Подземная лаборатория LSM

Для снижения космогенной составляющей фона эксперимент расположен в подземной лаборатории LSM в туннеле Frejus (граница Франции и Италии)



Для снижения космогенной составляющей фона эксперимент расположен в подземной лаборатории LSM в туннеле Frejus (граница Франции и Италии)

Глубина 1700м (4800 м водного эквивалента):

- 5 мюона/м<sup>2</sup>/день (в ~ 10<sup>6</sup> раз меньше, чем на поверхности)
- 1500 нейтронов (E>1 MeV)/м<sup>2</sup>/день (в основном естественная радиоактивность в ~ 10<sup>4</sup> раз меньше, чем на поверхности)